

Análise do Processo de Injeção Verificando a Relação entre a Capabilidade das Variáveis e a Qualidade da Peça

António Pedro Almeida Ferreira Gomes

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. António Torres Marques

Coorientador na FEUP: Prof. Maria Henriqueta Nóvoa

Orientador na empresa: Eng. Nelson Madaleno



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2018

À minha família

Resumo

Atendendo à competitividade do setor automóvel, a quantidade de peças defeituosas rejeitadas durante a produção necessita de ser controlada e reduzida ao mínimo possível, procurando-se tendencialmente atingir a meta dos “Zero defeitos”. As inúmeras variáveis que envolvem o processo de injeção de plástico conferem-lhe uma elevada complexidade, dificultando muitas vezes a identificação das causas que dão origem aos defeitos. A elaboração deste trabalho académico surge da necessidade da Simoldes Plásticos ter à sua disposição uma ferramenta que quantifique a contribuição que cada parâmetro de injeção tem nas características-críticas de qualidade do processo (peso, cota índice e aspeto visual), e que estime a combinação paramétrica que reduza a variação natural do processo em torno do seu valor nominal especificado. O método proposto tem por base teoria de Desenho de Experiências, e mais concretamente Taguchi.

O método foi validado com a sua aplicação ao molde MO6490, que excedia o limite máximo de 8000 PPM de peças rejeitadas durante o período em estudo. Foi também aplicado ao molde que serviu de objeto de estudo a metodologia *DMAIC* (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar), com o objetivo de reduzir a variação do processo através da eliminação das fontes exteriores de perturbação. A utilização desta metodologia pressupõe o uso de ferramentas de Qualidade como: índices de capabilidade, cartas de controlo, gráficos de Pareto, documentos *FMEA* e digramas Ishikawa.

A realização do projeto permitiu que de uma forma sistematizada fossem identificados os tipos de defeito mais frequentes (pintas, manchas, riscos, raiados e incompletos), que as possíveis causas que lhes dão origem fossem determinadas, e se propusessem medidas de melhoria que tornem o processo mais produtivo.

Abstract

Given the high competitiveness in the Auto-Industry, the quantity of faulty parts during production (non-conformance costs) needs to be controlled and reduced to the minimum possible amount, having as a final target a “Zero-defect” process. Plastic injection process possesses a high number of variables which makes it such complex that has as a consequence a difficult assessment, identification and root-cause analysis.

This work has come up on the case-study of a company, Simoldes Plásticos, and its identified necessity to have a tool which enables a clear identification and contribution of each injection parameters in the key quality characteristics of Process Quality (weight, Index and aesthetics), which finally lead to a parametric estimation which can reduce the variation as much as possible from its nominal value.

The method here proposed has on its basis the Design of Experiments, by Taguchi. A validation of this method has been made on an application of the Tool MO6490 which exceeded the maximum established limit of 8.000 PPM rejected parts on the established studied time frame. In parallel, for this tool, it has also been subject to a study using the methodology of *DMAIC* (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) targeting the elimination of outside perturbation sources and by that reducing the process variation. Several Quality Tools have been implemented such as Capability Index, Control Charts; Pareto; *FMEA* and Ishikawa diagrams.

In summary, this project has enabled to identify in a systematic way the most common defects (sink marks, scratches; incomplete structure) and performing root-cause analysis and by that making it possible to pin-point improvement measures in order to eliminate these variations on the process and consequently reducing the faulty number of parts.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Torres Marques, na qualidade de Orientador da dissertação, por toda a disponibilidade e apoio prestado no esclarecimento de dúvidas, na transmissão de conhecimentos e de experiência.

À Professora Doutora Maria Henriqueta Sampaio da Nóvoa, na qualidade de Coorientadora, pela disponibilidade e esclarecimentos prestados.

Ao Engenheiro Nelson Madaleno, na qualidade de orientador de estágio pelo seu precioso contributo no estímulo, esclarecimento de dúvidas e documentação, tornando possível a concretização desta dissertação.

A todas as pessoas pertencentes à secção de Especialistas de Moldes e Injeção de Plástico do departamento de Engenharia da Simoldes Plásticos pela forma como me acolheram, e por todo o conhecimento e experiência transmitido. Em especial ao Renato Correia por ter acompanhado de perto a minha evolução.

Ao Nuno Fonseca, na qualidade de responsável dos PPM do departamento de Produção, pela transmissão de conhecimento e experiência.

Ao Vítor Beleza, na qualidade de responsável da Metrologia, pela sua gentileza e amabilidade nas informações prestadas.

À Professora Doutora Maria Henriqueta Sampaio da Nóvoa, na qualidade de Coorientadora, pela disponibilidade e esclarecimentos prestados.

Ao Professor Doutor Nuno Costa, na qualidade de Professor do Instituto Politécnico de Setúbal pelos conhecimentos e experiência transmitida.

À Simoldes Plásticos por me ter dado a oportunidade de realizar a dissertação em ambiente empresarial, contribuindo com uma bolsa para que a sua execução fosse possível.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do Projeto e Motivação	1
1.2	Apresentação da Empresa	1
1.2.1	Simoldes Plásticos	1
1.2.2	Departamento de Engenharia e Desenvolvimento	3
1.3	Objetivos do projeto.....	3
1.4	Estrutura da dissertação.....	3
2	Revisão do estado de arte	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Evolução do Processo de Injeção de Plástico.....	5
2.3	Ciclo de Injeção	5
2.4	Máquina de Injeção (Figura 8).....	8
2.4.1	Tremonha (Figura 9).....	9
2.4.2	Cilindro de Plasticização	9
2.4.3	Parafuso Sem-Fim	10
2.4.4	Válvula de Não-Retorno.....	10
2.5	O Molde para injeção de plástico	11
2.5.1	Constituição do molde (figura 12)	11
2.6	Materiais Poliméricos	12
2.6.1	Efeito da Cristalinidade nos Termoplásticos.....	13
2.6.2	Compressibilidade	14
2.7	Impacto dos Parâmetros-Chave	14
2.7.1	Velocidade de Injeção.....	15
2.7.2	Temperatura de Injeção.....	16
2.7.3	Temperatura do Molde.....	17
2.7.4	Tempo e 2ª Pressão	17
2.7.5	Contrapressão e Rotação do fuso (Figura 20).....	18
2.7.6	Sensores de Pressão e Temperatura na Cavidade	18
2.8	Principais Defeitos Visuais (Figuras 22 e 23).....	19
3	Metodologia.....	23
3.1	Introdução.....	23
3.2	DMAIC – Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (Figura 29)	23
3.2.1	Definir.....	24
3.2.2	Medir	24
3.2.3	Analisar	26
3.2.4	Melhorar	27
3.2.5	Controlar	27
3.3	Desenho de Experiências.....	27
3.3.1	Taguchi	28
3.3.2	Desenho de Experiências em Injeção de Plástico	29
3.3.3	Método	30
4	Caso de Estudo.....	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	Aplicação Metodologia DMAIC.....	33
4.2.1	Definir.....	33
4.2.2	Medir	36
4.2.3	Analisar	37
4.2.4	Melhorar	44
4.2.5	Controlar	45

4.3	Aplicação Método Taguchi	45
4.3.1	Seleção das características-críticas de qualidade, fatores e níveis - matriz L_{12}	46
4.3.2	ANOVA – Cota Índice	47
4.3.3	ANOVA – Peso	49
4.3.4	Seleção de fatores e níveis – matriz L_9	52
4.3.5	Otimização – Cota Index.....	53
4.3.6	Otimização – Peso	54
4.3.7	Otimização – Cota Index & Peso	56
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	57
5.1	Conclusões.....	57
5.2	Trabalhos Futuros	58
	Referências	60
ANEXO A:	Cartas de controlo.....	63
ANEXO B:	Interações	72
ANEXO C:	Ficha de Parâmetros.....	75
ANEXO D:	Ficha Técnica do Material.....	76

Siglas

ANOVA – Análise de Variância

C_p – Índice de Capabilidade potencial

C_{pk} – Índice de Capabilidade efetiva

DMAIC – Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar

DOE – Desenho de Experiências

FMEA – Análise de Modos de Falhas e Efeitos

LIE – Limite Inferior Especificado

LSE – Limite Superior Especificado

MSD – Média-Desvio Padrão

PPM – Partes por Milhão

S/N – Razão Sinal-Ruído

SP – Simoldes Plásticos

TIE – Especialista de Moldes e Injeção

μ - Média

Índice de Figuras

Figura 1 - Localização das unidades da Divisão Plásticos (http://www.simoldes.com/plastics/)	2
Figura 2 - Exemplos de componentes produzidos na SP (http://www.simoldes.com/plastics/)2	2
Figura 3 - Ciclo de Moldação (Cruz, 2002).....	6
Figura 4 - Pormenor da etapa do fecho (Pinto, 2012).....	7
Figura 5 - Pormenor da etapa de injeção (Pinto, 2012)	7
Figura 6 - Pormenor da etapa de compactação (Pinto, 2012).....	7
Figura 7 - Pormenor da etapa de abertura e extração (Pinto, 2012)	8
Figura 8 - Principais constituintes de uma máquina de injeção (Rutland, 2018)	9
Figura 9 - Tremonha (Bryce, 1996)	9
Figura 10 - Evolução do estado do material ao longo das zonas do parafuso (Kulkarmi, 2010)	10
Figura 11 - Funcionamento da válvula de não-retorno (a) plasticização (b) injeção (Kulkarmi, 2010)	11
Figura 12 - Nomenclatura do molde (Gonçalves, 2014).....	12
Figura 13 - Classificação dos polímeros (http://www.demar.eel.usp.br/polimeros)	13
Figura 14 - Temperaturas de processamento para polímeros amorfos e cristalinos (Kulkarmi, 2010)	14
Figura 15 - Gráfico P-V-T do polistireno (Beamont, 2004).....	14
Figura 16 - Variáveis-chave no processo de injeção de plástico (Yang <i>et al</i> , 2016).....	15
Figura 17 - Relação entre tempo-pressão-temperatura na injeção (Shoemaker, 2006)	16
Figura 18 - Relação entre temperatura-tensão de corte-peso (Shoemaker, 2006)	17
Figura 19 - Relação entre 2ª Pressão-tempo-peso da peça (Shoemaker, 2006).....	18
Figura 20 - Movimento do fuso na plastificação (Shoemaker, 2006).....	18
Figura 21 - Típica evolução da pressão na cavidade (Kulkarmi, 2010)	19
Figura 22 - Rebarba (Centimfe, 2004).....	19
Figura 23 - Bolhas de ar (Centimfe, 2004)	19
Figura 24 - Pontos Pretos (Vikash <i>et al</i> , 2014).....	20
Figura 25 - Linha de Soldadura (Randelovic, 2015).....	20
Figura 26 - Peça Incompleta (Randelovic, 2015)	20
Figura 27 – Peças com diferentes brilhos (Pavlicková, 2016).....	21
Figura 28 – Estrias negras (Kasia, 2010).....	21
Figura 29 - Etapas da Metodologia DMAIC.....	23
Figura 30 - Carta de controlo (Montgomery, 2009)	25
Figura 31 - Gráfico de Pareto (Kent, 2016)	26
Figura 32 - Exemplo de diagrama Ishikawa	26

Figura 33 - Modelo geral de um processo (Montgomery, 2013).....	27
Figura 34 - (a) Experiência sem Interação (b) Experiência com Interação (Montgomery, 2009).	28
Figura 35 - Estrutura experimental do método	31
Figura 36 - Evolução PPM do molde M6490 no período em análise.....	34
Figura 37 - Máquina EN 400 XIV	34
Figura 38 - Macho.....	35
Figura 39 – Cavidade	35
Figura 40 - Parte superior da peça	35
Figura 41 - Parte inferior da peça	35
Figura 42 - Caraterísticas-Críticas de Qualidade (<i>CQT</i>).....	36
Figura 43 - Gráfico de Pareto do molde MO6490 do mês de Fevereiro.....	38
Figura 44 - Gráfico de Pareto do molde MO6490 do mês de Março	38
Figura 45 - Gráfico de Pareto do molde MO6490 do mês de Abril	39
Figura 46 - Gráfico de Pareto do molde MO6490 do mês de Maio	39
Figura 47 - Diagrama Ishikawa para os defeitos pintas e manchas	40
Figura 48 - Diagrama Ishikawa para o defeito riscos	41
Figura 49 - Diagrama Ishikawa para o defeito raiados	42
Figura 50 - Diagrama Ishikawa para o defeito incompletos	42
Figura 51 - Impacto dos parâmetros na cota índice da cavidade 1	48
Figura 52 - Impacto dos parâmetros na cota índice da cavidade 2	49
Figura 53 - Impacto dos parâmetros no peso da cavidade 1	51
Figura 54 - Impacto dos parâmetros no peso da cavidade 2.....	51

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Quantidade de peças produzidas e rejeitadas nos meses de estudo	34
Tabela 2 – Valores limite e especificados para o peso e cota índice	36
Tabela 3 – Índices de capacidade das características-críticas das duas cavidades.....	37
Tabela 4 – Resultado ensaio de capacidade da máquina EN400 XIV	37
Tabela 5 – Potencial de melhoria do molde M06490	38
Tabela 6 – Níveis e fatores utilizados na matriz L_{12}	46
Tabela 7 – Perfil de contrapressão e de velocidade de injeção.....	46
Tabela 8 – Matriz L_{12}	47
Tabela 9 – Resultados da cota índice matriz L_{12}	47
Tabela 10 – Resultados da ANOVA para a cota índice da cavidade 1	48
Tabela 11 - Resultados da ANOVA à cota índice da cavidade 2	48
Tabela 12 - Resultados do peso matriz L_{12}	50
Tabela 13 - Resultados da ANOVA para o peso da cavidade 1	50
Tabela 14 - Resultados da ANOVA para o peso da cavidade 2	51
Tabela 15 - Níveis e fatores utilizados na matriz L_9	52
Tabela 16 - Novos valores nominais da cota índice	52
Tabela 17 - Matriz L_9	53
Tabela 18 - Resultados da cota índice matriz L_9	53
Tabela 19 - Tabela dos efeitos principais para a cota índice da cavidade 1	54
Tabela 20 - Tabela dos efeitos principais para a cota índice da cavidade 2	54
Tabela 21 - Resultados solução A.....	54
Tabela 22 - Resultados do peso matriz L_9	55
Tabela 23 - Tabela dos efeitos principais para o peso da cavidade 1	55
Tabela 24 - Tabela dos efeitos principais para o peso da cavidade 2	55
Tabela 25 - – Resultados solução B.....	55
Tabela 26 - Quocientes S/N individuais e totais.....	56
Tabela 27 - Índices capacidade solução A	56

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação

Esta dissertação enquadra-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na opção de Produção, Conceção e Fabrico, abrangendo matérias nele lecionado, aprofundando conhecimento numa área tão especializada como é o processo de injeção de plástico e de moldes.

O tema deste trabalho académico decorreu em ambiente empresarial, no departamento de Engenharia e Desenvolvimento da Simoldes Plásticos, resultando da constatação para a necessidade de se compreender e sistematizar o impacto que as diversas variáveis existentes no processo (máquina, molde, material, operador) têm na qualidade final da peça, tendo em vista a sua melhoria.

Devido à competitividade do sector automóvel, a administração da SP tem por objetivo reduzir a taxa de rejeição das peças defeituosas ao mínimo possível, tomando ações no sentido de atingir a meta dos “Zero Defeitos”.

Qualquer processo tem uma variação inerente associada, muitas vezes ampliada por fatores externos nem sempre fáceis de identificar. Quando essa variação ultrapassa certos limites, peças não conformes são produzidas, aumentando a taxa de rejeição e os custos operacionais, afetando a confiança e a satisfação do cliente.

O projeto desenvolvido seguiu a metodologia *DMAIC* (Definir-Medir-Analisar-Melhorar-Controlar), e a criação de uma ferramenta de otimização paramétrica com base na técnica de Desenho de Experiências, assentando no princípio de que um aumento do controlo sobre as variáveis do processo e uma escolha otimizada dos parâmetros de injeção, levando a resposta das características-críticas de qualidade a variar o mínimo em torno do seu valor nominal, introduz uma melhoria na qualidade das peças produzidas e na redução de desperdício.

1.2 Apresentação da Empresa

1.2.1 Simoldes Plásticos

A Simoldes Plásticos é uma empresa pertencente à Divisão de Plásticos do Grupo Simoldes, localizada em Oliveira de Azeméis. O Grupo Simoldes foi fundado em 1959 pela mão do seu atual proprietário Sr. António Rodrigues com a criação da primeira empresa, a Simoldes Aços, que se dedica à construção de moldes para injeção de plásticos.

A SP iniciou a sua laboração na década de 80, impulsionada por projetos desenvolvidos para a fábrica da Renault Portugal. Desde então, a capacidade produtiva da Divisão tem vindo a aumentar, possuindo atualmente unidades industriais em países como França, Polónia, Brasil e República Checa e, ainda, unidades técnico/comerciais na Alemanha, França e Espanha. A figura 1 indica a localização geográfica de cada uma das unidades.

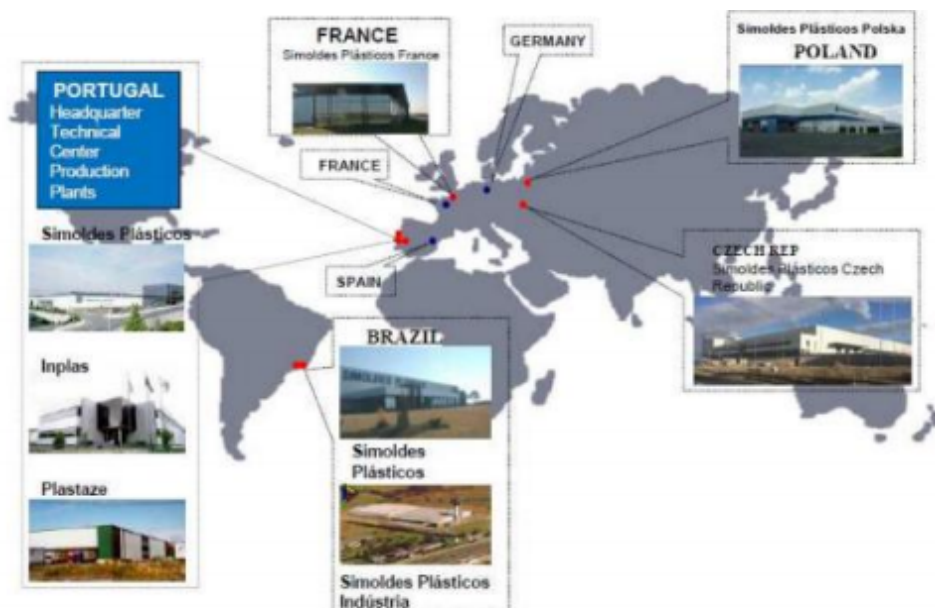


Figura 1 - Localização das unidades da Divisão Plásticos (<http://www.simoldes.com/plastics/>)

O facto de o grupo ter uma divisão onde se constroem os moldes e oferecer a possibilidade aos seus clientes de produzir as peças por injeção nas suas instalações, é uma enorme mais valia, permitindo fazer um acompanhamento dos moldes em produção de série, implementando-lhes melhorias e reter conhecimento a ser utilizado para futuros projetos.

Os principais clientes da SP pertencem ao sector automóvel, nomeadamente, o Grupo Volkswagen, Renault e PSA, relação que se tem revelado duradoura, provando a confiança depositada pelos seus clientes.

Com uma área de aproximadamente 26.000 m² e mais de 700 colaboradores, a unidade produz pelo processo de injeção de plástico diversos artigos para o interior e exterior de automóveis, como: painéis de porta, componentes de banco, pilares, protetores de roda, para-choques, pedais, painel de instrumentos, entre outros.

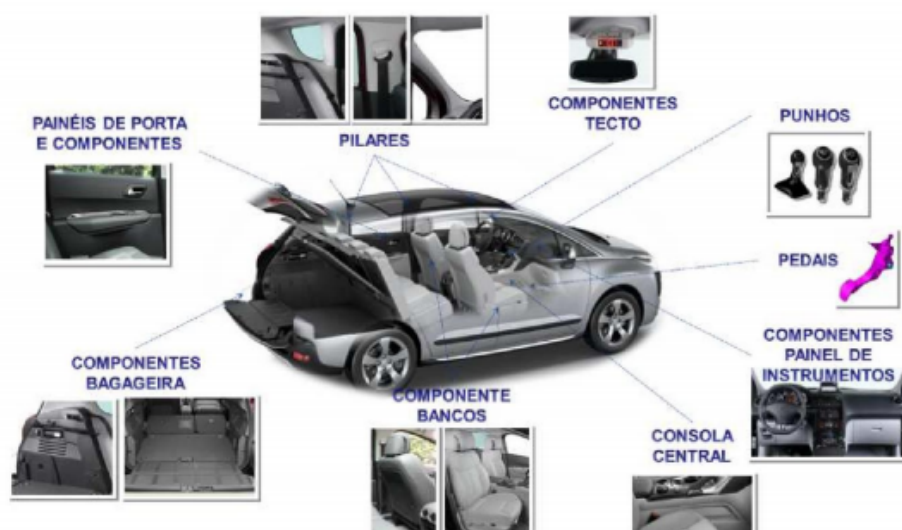


Figura 2 - Exemplos de componentes produzidos na SP (<http://www.simoldes.com/plastics/>)

1.2.2 Departamento de Engenharia e Desenvolvimento

O estágio decorreu no Departamento de Engenharia e Desenvolvimento. Este é dividido entre a secção de CAD, onde é feito o desenvolvimento de produto de acordo com as especificações requeridas pelo cliente, e a secção dos TIE (*Tool and Injection Molding Expert*), sigla inglesa para Especialista de Injeção e de Moldes, onde tive a oportunidade de colaborar em permanência.

O Especialista de Injeção e de Moldes é um dos principais intervenientes na construção do molde, fazendo a ligação entre o projetista de produto e o construtor do molde. É da sua responsabilidade avaliar a capacidade do molde na produção da peça, antevendo possíveis defeitos que venham a advir de uma má construção da ferramenta. É ele quem adjudica a construção do molde, o que obriga a um conhecimento do custo dos componentes. Participa ativamente em reuniões de projeto preliminar, altura em que é estudada e definida a sua melhor tipologia. Faz o seguimento da construção, aferindo se o planeamento está de acordo com o inicialmente definido. Acompanha os ensaios, altura em que o molde é montado na máquina de injeção e produz as primeiras peças, identificando as correções a serem feitas quando estas não são resolúveis por afinação dos parâmetros de injeção.

O facto de ter tido a oportunidade de acompanhar um TIE nas suas tarefas, permitiu-me adquirir conhecimentos sobre o funcionamento de moldes e do processo de injeção de plástico, ganhando sensibilidade no impacto que os parâmetros de injeção têm na qualidade da peça.

1.3 Objetivos do projeto

De uma forma genérica, o objetivo do estágio e deste projeto consiste na análise e melhoria do processo de injeção de plástico, recorrendo-se para isso a conceitos de melhoria contínua como *DMAIC*, e Desenho de Experiências. Pretende-se com este trabalho melhorar a consistência na produção de peças com qualidade, compreendendo todo o processo e as variáveis que afetam o resultado final da peça, desde o armazenamento da matéria-prima, transporte até à máquina, condições a que esta opera e ao processo de injeção de plástico propriamente dito.

O projeto compreende então os seguintes objetivos:

- Identificar com base na metodologia *DMAIC* causas especiais que provoquem perturbação ao processo, propondo ações de melhoria que as eliminem ou mitiguem, tendo em vista a redução de desperdício;
- Propor com base na técnica de Desenho de Experiências um método que otimize a escolha dos parâmetros de injeção no sentido de diminuir a variação natural do processo, levando a resposta das características-críticas de qualidade a variarem o mínimo em torno do valor nominal especificado.

1.4 Estrutura da dissertação

O conteúdo do documento desta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos.

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema, apresentação da empresa onde decorreu o estágio, dos objetivos propostos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é explanada a fundamentação teórica do processo de injeção de plástico, descrevendo as variáveis envolvidas (molde, máquina, material) e os defeitos mais comuns.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia seguida, as diferentes etapas do projeto *DMAIC*, desde a definição do problema, passando pela análise, melhoria até ao controlo. É

feita uma abordagem sobre teoria de Desenho de Experiências, assim como a ferramenta proposta de otimização dos parâmetros de injeção.

No capítulo 4 é apresentado o molde que servirá de caso de estudo, identificando e analisando os defeitos mais recorrentes, apresentando sugestões de melhoria que ajudem a eliminar a sua origem. É também testada a ferramenta de otimização paramétrica desenvolvida.

No capítulo 5 são referidas as conclusões ao trabalho efetuado, bem como sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão do estado de arte

2.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se fazer uma revisão bibliográfica acerca do processo de injeção, identificando as variáveis do processo que impactam a qualidade final da peça: molde, máquina, condições de processamento e material. São também expostos casos de estudo que utilizaram a metodologia *DMAIC* para corrigir os defeitos existentes.

2.2 Evolução do Processo de Injeção de Plástico

Um dos métodos mais utilizados na conformação de materiais plásticos, é a transformação sob pressão, ou seja, injeção em moldes. É bem visível a utilização do plástico em produtos do quotidiano, nomeadamente: componentes de automóvel, material de escritório, material para habitação, brinquedos, etc, sendo que o surgimento do processo por injeção remonta ao final do século XIX.

Em 1872 os irmãos Hyatt patentearam a primeira máquina de injeção na cidade de Nova York, Estados Unidos, dando origem ao processo de injeção. Nessa altura, a utilização estava restrita ao processamento da celulose (Crawford, 1998). A máquina era constituída por um cilindro aquecido e um pistão atuado hidraulicamente. No seu interior existia uma peça metálica com o formato de torpedo, em que a função era distribuir o material contra as paredes. O conjunto estava disposto verticalmente e encontrava-se ligado ao molde por um tubo aquecido e montado numa prensa hidráulica (Cunha, 1997).

Com o passar dos anos, verificaram-se evoluções na tipologia das máquinas, passando o regime das operações de manual para automático, com controlos elétricos. O grande marco deu-se quase 70 anos depois da primeira versão da máquina, quando em 1948 foi apresentada por James Henry a primeira injetora com um parafuso sem-fim, substituindo o anterior funcionamento por êmbolo (Kulkarmi, 2010). O uso do parafuso sem-fim permite uma melhor homogeneização do material plasticizado, possibilitando a transformação de maiores volumes de material e, portanto, de peças com uma maior geometria.

As máquinas de injeção têm sofrido um enorme progresso, capazes de produzir peças complexas da mais variada geometria e tamanho. Consegue-se ter um melhor controlo do processo com os avanços na engenharia de eletrónica, várias soluções de parafusos sem-fim, e até máquinas com sistemas de funcionamento totalmente elétrico (Kulkarmi, 2010).

2.3 Ciclo de Injeção

A injeção de materiais termoplásticos consiste num processo cíclico, tendo por objetivo produzir peças conformes e de acordo com o especificado em projeto, no mais curto intervalo de tempo possível. O processo é composto por diversas fases, sendo que a sua otimização é fundamental para assegurar a rentabilização económica dos equipamentos adquiridos.

O ciclo pode ser efetuado de três modos distintos (Cunha, 2004):

- **Manual:** A sequência de operações é acionada manualmente pelo operador.
- **Automático:** É neste regime em que a maximização da produtividade e da fiabilidade é conseguida. Todo o processo é desenvolvido segundo uma sequência pré-definida e sem a intervenção do operador.
- **Semiautomático:** Este regime é um misto dos dois anteriores, aplicando-se quando por algum motivo a produção necessita de ser interrompida (alteração de inserts, prisão de peça na extração, etc). A sequência de operações desenvolve-se pois de uma forma automática, no entanto, é necessária uma intervenção por parte do operador, dando início a um novo ciclo.

O processo de moldação inicia-se com a preparação da matéria-prima, devendo o material polimérico ser previamente seco e desumidificado de acordo com a temperatura e a duração estipulados na ficha técnica.

Posta essa fase preliminar, o ciclo de injeção propriamente dito inicia-se com o fecho do molde, seguindo-se a injeção, compactação, arrefecimento, abertura e extração, e por fim o tempo de pausa.

As diferentes etapas do ciclo de injeção apresentam-se na figura 3.

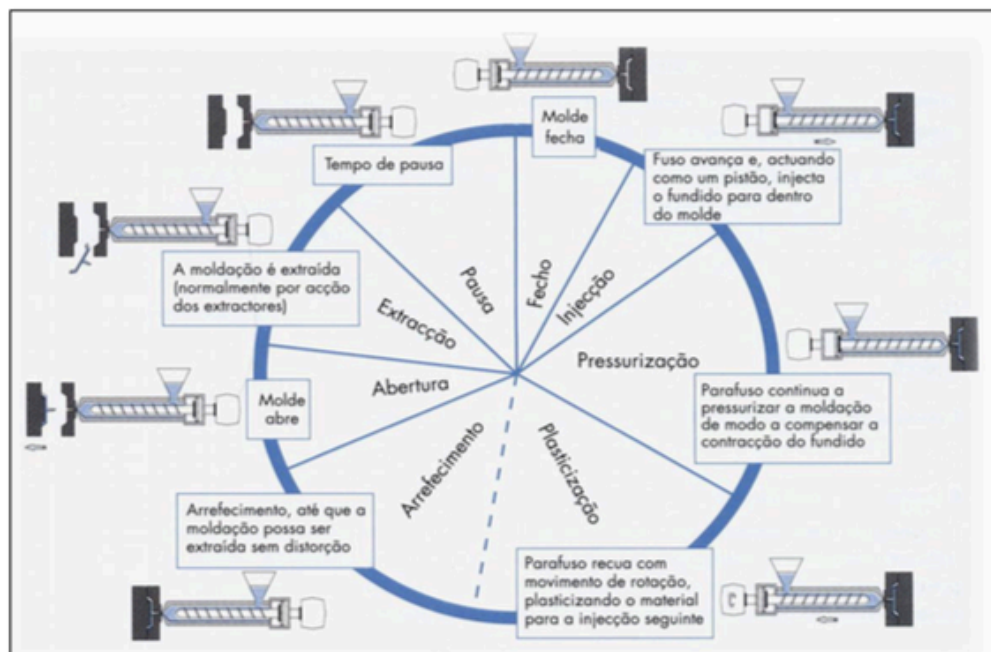


Figura 3 - Ciclo de Moldação (Cruz, 2002)

1) Fecho

O ciclo de moldação tem início com esta etapa, devendo ser tanto mais rápida quanto possível, minimizando assim o tempo de ciclo. O intervalo de tempo em que o molde é fechado está dependente da capacidade da máquina, das características do molde e do curso que terá de percorrer. É usual o fecho ter um início mais rápido e quando as superfícies da cavidade e do macho estiverem próximas a velocidade ser reduzida, evitando que o impacto das massas metálicas danifiquem as superfícies de ajustamento, assim como os movimentos mecânicos internos que o molde possa ter sejam ativados de uma forma suave. Uma maneira de poupar alguns segundos é ajustar o curso ao mínimo necessário que possibilite a ejeção e extração por parte do robot.



Figura 4 - Pormenor da etapa do fecho (Pinto, 2012)

2) Injeção

A etapa de injeção tem início após o molde se encontrar fechado. O material que se encontra no fuso é empurrado pelo seu movimento linear, forçando-o a entrar no molde, fluindo no interior da impressão. Durante o avanço do fuso, o material é mantido no estado líquido por resistências elétricas que envolvem o cilindro. A escolha da velocidade de injeção terá que obedecer a um compromisso entre rapidez, em que o fluido deverá preencher a totalidade da zona moldante antes de solidificar, e a qualidade do produto final, que poderá ficar comprometida caso as velocidades sejam demasiado elevadas, podendo provocar degradação do material por sobreaquecimento ou efeitos de jato.



Figura 5 - Pormenor da etapa de injeção (Pinto, 2012)

3) Compactação (Figura 6)

A fase de compactação, ou pressurização, é fundamental para garantir que a peça final sai de acordo com os requisitos de qualidade especificados. Terminada a etapa de injeção, a peça irá arrefecer e contrair, e para evitar este efeito, assim como o refluxo do fundido, o material deve ser pressionado. O funcionamento do equipamento mudará de regime, passando o controlo a ser feito por pressão, ao invés do que sucede na fase de enchimento, em que o controlo é por velocidade. O valor da segunda pressão, como também pode ser designada, tem impacto significativo na peça, pelo que também deverá existir uma relação de compromisso, uma vez que valores demasiado elevados poderão provocar tensões internas na peça. Os valores médios encontram-se à volta de 40 a 50% da pressão utilizada na injeção.

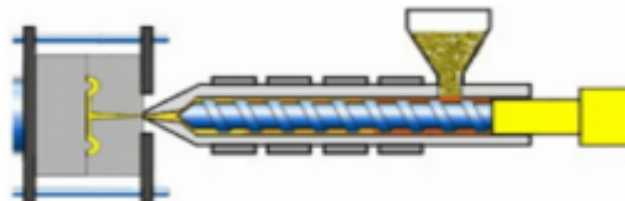


Figura 6 - Pormenor da etapa de compactação (Pinto, 2012)

4) Arrefecimento

O arrefecimento é responsável por uma importante parcela do tempo de ciclo, iniciando a sua contabilização assim que o ataque é consolidado. Após a compactação do material, o fuso recua num movimento combinado, linear e rotativo, plastificando o material para o ciclo seguinte. O curso de plastificação garantirá o volume necessário de material, sendo que a este se poderá adicionar um recuo linear com o objetivo de descomprimir o fundido, evitando assim que haja escorrimento no bico.

De modo a evitar distorções na peça, a distribuição dos canais de arrefecimento nos blocos moldantes e nos movimentos devem permitir que a redução da temperatura seja conseguida de uma forma uniforme.

5) Abertura e extração (Figura 7)

O tempo de operação da abertura e extração da peça, é função da máquina e do molde, uma vez que movimentos de pré-abertura ou outros movimentos necessários à sua correta desmoldagem aumentam a complexidade da etapa. Mecanismos auxiliares, como robôs com mãos-presa associadas, são utilizados, garantindo assim um elevado grau de automatização do processo.



Figura 7 - Pormenor da etapa de abertura e extração (Pinto, 2012)

6) Tempo de pausa

O tempo de pausa, compreendido entre o fim da extração e o início do novo ciclo, está dependente do grau de automatização do processo, da aptidão do operador e do tipo de afinação utilizado. Pretende-se que este intervalo de tempo seja tão curto quanto possível, para fins de otimização de tempo de ciclo, mas também para garantir uma melhor reprodutibilidade do processo.

2.4 Máquina de Injeção (Figura 8)

Existem no mercado inúmeras soluções de máquinas de injeção, podendo ser classificadas de diferentes formas, nomeadamente, quanto ao tipo de acionamento, dimensão, força de fecho, aspetos construtivos, natureza dos materiais a processar, ou direção de funcionamento. As injetoras horizontais são utilizadas na maioria dos casos, com a vantagem das peças ejetadas caírem por gravidade e serem facilmente apanhadas.

A máquina de injeção é composta por quatro unidades principais que asseguram o processamento do material: unidade de potência, unidade de injeção, unidade de fecho, e unidade de comando.

- Unidade de potência é responsável por fornecer energia aos atuadores, lineares e rotativos da máquina. Geralmente é composto por um sistema de pressão óleo-hidráulico, em que a bomba é ativada por um motor elétrico.
- Unidade de injeção é composto por um parafuso sem-fim envolto num cilindro com resistências elétricas, com a finalidade de promover o transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização do material, desde a base da tremonha, até ao bico de injeção.
- Unidade de fecho construtivamente equivale a uma prensa, assegurando a movimentação e fecho do molde. Tem como função contrariar a força imposta na injeção e compactação do material. As soluções construtivas mais comuns são, as unidades em joelheira e de fecho hidráulico.
- Unidade de comando faz a ligação entre a máquina e o operador, sendo possível controlar e monitorizar os parâmetros do processo através da sua interface. Assegura igualmente a comunicação com periféricos ou sistemas de gestão de manutenção.

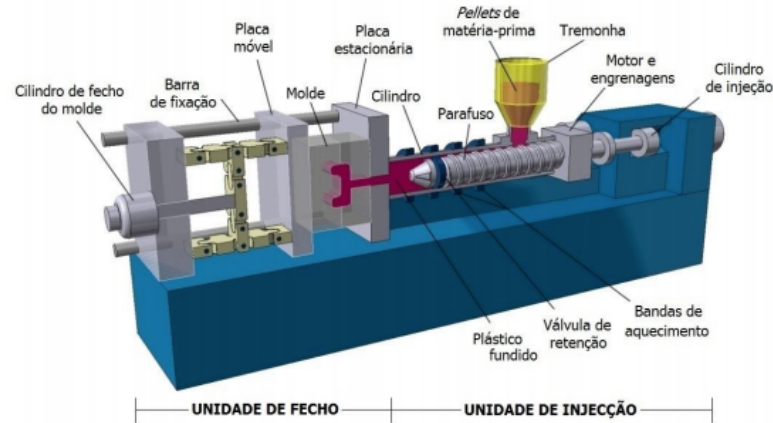


Figura 8 - Principais constituintes de uma máquina de injeção (Rutland, 2018)

2.4.1 Tremonha (Figura 9)

O equipamento onde é guardado o material antes deste entrar no cilindro aquecido e ser processado é a tremonha. Esta tem uma geometria afunilada por forma a facilitar o escoamento da matéria-prima. O seu volume é projetado de maneira a que tenha capacidade para abastecer em média duas horas de produção. A base da tremonha deve estar equipada por um íman que retenha qualquer partícula metálica que se insurja no sistema. Estas partículas podem ser provenientes de uma contaminação accidental na armazenagem da matéria ou na sua produção, através das pás metálicas dos misturadores, soltando limalha. A presença de metal no sistema, ainda que de partículas de reduzida dimensão, poderá provocar enormes danos no parafuso, cilindro ou molde, pelo que é necessário uma limpeza sistemática do íman para que a sua função seja garantida (Bryce, 1996). Da mesma forma, a tremonha deverá também impedir a contaminação do material de outros agentes como poeiras ou humidade, permitindo uma fácil limpeza (Cunha, 2004).

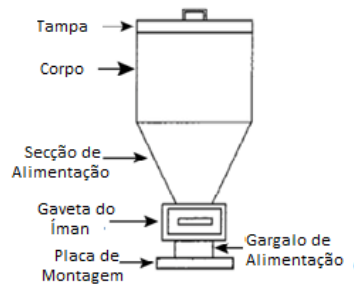


Figura 9 - Tremonha (Bryce, 1996)

2.4.2 Cilindro de Plasticização

O cilindro de plasticização é um tubo metálico de elevada espessura, em que no seu interior trabalha o parafuso sem-fim. Encontra-se ligado aos sistemas de acionamento do fuso na sua zona anterior, e na zona posterior ao molde (Cunha, 2004). A superfície em contacto com o parafuso encontra-se revestida com um aço de elevada dureza, por norma com alto teor de cromo, capaz de suportar os esforços abrasivos a que está sujeito. No seu exterior é abraçado por resistências elétricas com o mínimo espaçamento entre si, divididas e controladas separadamente em três zonas distintas. Termopares instalados informam a unidade de controlo acerca da temperatura em cada zona, tomando esta a decisão de ligar ou desligar as resistências por ciclos consoante o limite máximo e mínimo definidos, por forma a manter a temperatura no seu interior o mais estável possível em relação ao valor pretendido (Bryce, 1996).

2.4.3 Parafuso Sem-Fim

O parafuso sem-fim encontra-se instalado no cilindro de plasticização, tendo a finalidade de transportar o material fundido para a cavidade com a qualidade exigida. Resistências elétricas envolvem o cilindro fornecendo calor por energia radiante ao material, mantendo-o fluidificado. No entanto, o componente que desempenha um papel fundamental no processo de obtenção do fluido homogeneizado é o parafuso sem-fim. O sem-fim emprega uma tensão de corte ao material, ao mesmo tempo que o mistura e homogeneiza. É também um elemento fundamental no doseamento do volume empregue em cada injeção. (Kulkarmi, 2010).

Zona de alimentação: O material saído da base da tremonha entra no parafuso por esta zona. Nesta secção o diâmetro do parafuso é menor, iniciando o “amaciamento” do granulado com o seu movimento rotativo. O material não deve ser totalmente fundido, o que dificultaria a entrada de mais material.

Zona de transição: Nesta zona, o diâmetro começa gradualmente a aumentar, diminuindo a profundidade do canal (diferença entre o diâmetro maior e o do veio). Com a rotação do parafuso e a diminuição da profundidade do canal, o material é comprimido contra as paredes do cilindro levando à supressão do ar existente. As tensões de corte criadas no material e com o auxílio das resistências elétricas envolventes ao cilindro, levam a que material chegue ao final da zona de transição totalmente fluído.

Zona de medição: Esta é a zona mais próxima ao bico da máquina. A profundidade dos canais é mínima e constante. Uma vez que a alimentação é feita por recuo do parafuso até à posição de curso definida, a profundidade dos canais na zona de medição deverá ser mínima possível de modo a reduzir variações na quantidade de material na alimentação.

A figura 10 mostra a progressão do material à medida que este percorre cada secção do parafuso. Como se constata, na zona de alimentação os granulos da matéria-prima começam a ficar mais suaves e a aderir uns aos outros. Na zona de transição há evidências de o material ter sido comprimido, sendo a matéria uma mistura entre material fundido e não fundido. Junto ao bico, o material encontra-se totalmente fundido. Nos parafusos comuns, a comprimento da zona de alimentação é o dobro de cada uma das restantes zonas (Kulkarmi, 2010).

A geometria do parafuso depende do material a utilizar, no entanto, por constrangimentos económicos é comum utilizarem-se fusos *standard* para a generalidade dos polímeros, levando a ineficiências no processo. Um parafuso comum tem uma relação L/D de 20, um ângulo de hélice de $17,66^\circ$ e o passo de 1D. Para materiais elastómeros ou de elevada sensibilidade térmica utilizam-se razões L/D entre 15 e 18 (Cunha, 1997).

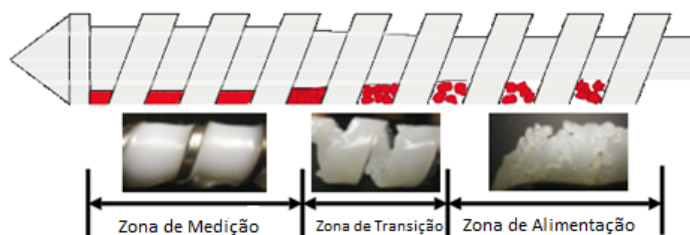


Figura 10 - Evolução do estado do material ao longo das zonas do parafuso (Kulkarmi, 2010)

2.4.4 Válvula de Não-Retorno

Na extremidade do parafuso junto ao bico encontra-se instalada uma válvula de não-retorno. Durante a fase de alimentação o parafuso é animado de um movimento combinado,

linear e rotativo, recuando até a um ponto definido que depende da quantidade de material pretendido. Nesta fase, a válvula encontra-se na posição de avanço, encostada à ponteira, permitindo a passagem do material através dos rasgos desta para a frente do parafuso. Na fase de injeção, em que o parafuso avança linearmente empurrando o material para a cavidade do molde, a válvula encosta ao corpo do parafuso, impedindo o recuo do fundido. Este componente necessita de ser verificado e substituído periodicamente, uma vez que ao sofrer desgaste, vai perdendo a capacidade de estancar o material, levando a que o processo sofra variação em cada injeção, podendo ser de material em excesso ou em falta. (Kulkarmi, 2010)

A eficiência é uma forma de avaliar o desempenho da válvula, sendo dada pela razão entre o fluxo de retorno e o material injetado. Em materiais cuja viscosidade é elevada, como no caso da poliamidas, um valor esperado para uma válvula em bom estado é de 95-96%, nos outros casos são expectáveis valores entre os 98 e os 99% (Cunha, 2004).

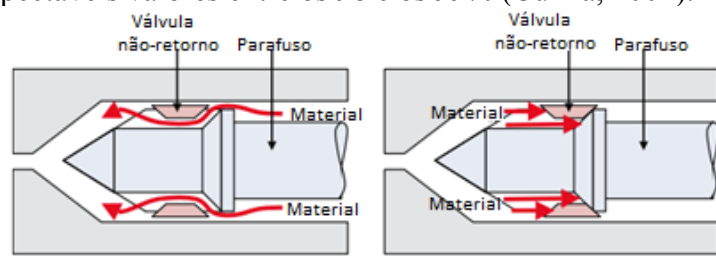


Figura 11 - Funcionamento da válvula de não-retorno (a) plasticização (b) injeção (Kulkarmi, 2010)

2.5 O Molde para injeção de plástico

Os moldes para injeção de plástico são sistemas complexos que têm de obedecer aos requisitos impostos pelo processo. A primeira função do molde é conseguir conter o material polimérico fundido na sua cavidade, preenchendo-a na sua totalidade de modo a que a peça produzida seja uma réplica fiel. A segunda função é que este seja capaz de transferir calor de uma forma eficiente e uniforme do material quente para o exterior, através do sistema de arrefecimento, garantindo que a peça não tem empenos ou distorções. A terceira função do molde é que este seja capaz de ejetar a peça de uma forma rápida e fiável (Kazmer, 2007).

Com os avanços tecnológicos, tanto nas máquinas de injeção como nas máquinas automáticas de construção do molde, é possível construírem-se tanto moldes de grande como de reduzidas dimensões. Produtos como para-choques para automóvel são hoje possíveis de produzir, contrariamente ao que sucedia no passado devido aos constrangimentos máquina-molde. Por outro lado, desenvolvimentos conseguidos ao nível de novos materiais e sistemas de processamento permitem que peças que anteriormente não eram produzíveis pelo processo de injeção, agora o sejam, nomeadamente produtos eletrónicos e válvulas para a indústria médica. A tolerância e dimensões bastante reduzidas destes e de outros produtos levam a que sejam construídos moldes que cabem numa mão (Bryce, 1996).

2.5.1 Constituição do molde (figura 12)

Os moldes são partes fundamentais do processo, compostos por componentes metálicos de alta precisão. Para tirar partido do elevado investimento que é necessário fazer, muitas vezes são-lhes incorporadas várias cavidades, aumentando a complexidade da sua construção.

Um molde mais simples é constituído por duas partes principais, uma fixa, do lado onde se dá a injeção, a fêmea, e outra móvel, onde por norma se encontram os movimentos de extração, o macho. A superfície que separa essas duas massas é designada por superfície de separação (Rosato, 1985). Pode ser considerado como uma estrutura de placas onde são

montados e maquinados os sistemas funcionais que permitem a execução das funções para que foi projetado (Cunha, 2004).

Os sistemas funcionais são:

- Impressão;
- Centragem e guiamento;
- Alimentação;
- Escapes de gases;
- Controlo de temperatura;
- Extração.

O sistema de centragem e guiamento permite de um lado montar o molde na máquina, e do outro, ajustar as partes do molde.

O sistema de alimentação, permite a passagem do polímero fundido desde a máquina até às zonas moldantes. Quando a placa de alimentação tem na sua constituição resistências elétricas, o enchimento é feito a quente.

O sistema de escape de gases é constituído por canais que fazem a ligação das zonas moldantes para o exterior, permitindo que o ar existente possa ser evacuado.

O sistema de controlo de temperatura, ou de arrefecimento, contribui para que o aquecimento e arrefecimento das peças seja rápido e uniforme.

A placa de extração confere movimento aos extratores com a função de extrair a peça (Cunha, 2004).

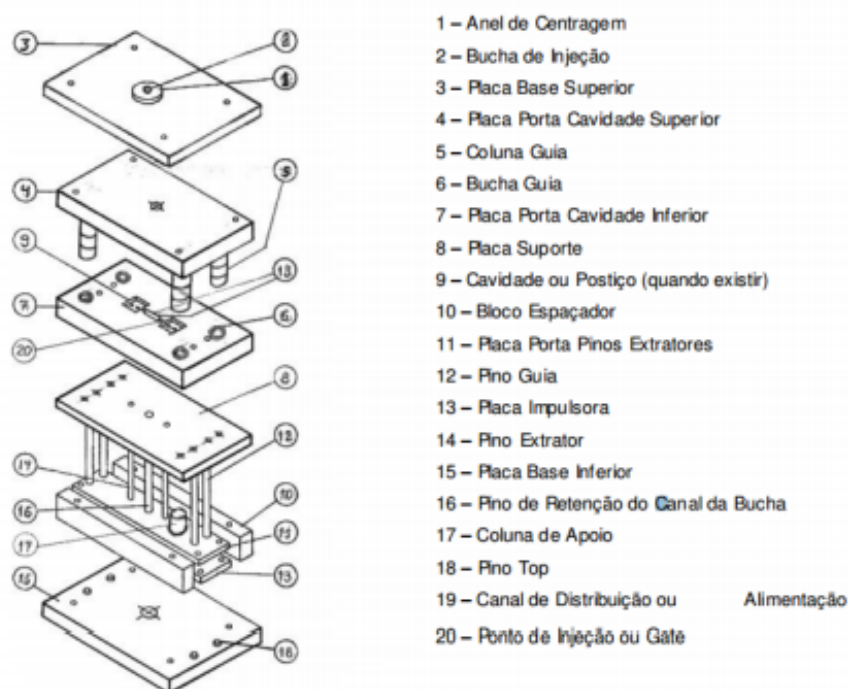


Figura 12 - Nomenclatura do molde (Gonçalves, 2014)

2.6 Materiais Poliméricos

Como o nome sugere, polímeros são materiais compostos por várias moléculas que resultam em longas cadeias. As moléculas maiores, são chamadas macromoléculas. As propriedades únicas dos polímeros assim como a versatilidade de métodos de conformação a que podem ser sujeitos são devidas à sua estrutura molecular. Propriedades como a baixa densidade, bom isolamento térmico e elétrico, e capacidade para serem conformados e moldados a temperaturas relativamente baixas comparativamente a outros materiais como o

ação, faz com que os polímeros sejam materiais cada vez mais utilizados nos mais diversos campos de aplicação (Osswald, 2012).

Os polímeros dividem-se em três categorias: termoplásticos, termoendurecíveis e elastômeros (figura 13)



Figura 13 - Classificação dos polímeros (<http://www.demar.eel.usp.br/polimeros>)

Os termoplásticos solidificam à medida que arrefecem, não permitindo que a sua longa cadeia de moléculas se mova livremente. Caso seja reaquecido, os materiais pertencentes a esta categoria readquirem a capacidade para “fluir” e se rearranjar. Os termoplásticos dividem-se em dois subgrupos: amorfos e semi-cristalinos. Os primeiros, ao arrefecerem têm a sua cadeia molecular desordenada, enquanto que os semi-cristalinos adquirem arranjo cristalino em certas zonas.

Os termoendurecíveis solidificam através de uma reação química. Durante a cura, as macromoléculas formam ligações cruzadas entre elas, impedindo-as de fluir mesmo depois de aquecidas. As fortes ligações desenvolvidas tornam o material rígido, que contrariamente aos termoplásticos não podem ser refundidos, uma vez que se degradam.

Os elastômeros comparativamente aos termoendurecíveis têm ligações cruzadas menos fortes, o que permite a quase extensão total das suas moléculas, e que deformações consideráveis sejam revertíveis.

Neste trabalho, o estudo incidirá sobre os termoplásticos.

2.6.1 Efeito da Cristalinidade nos Termoplásticos

As características de moldação de termoplásticos dependem da sua morfologia, se é cristalino ou amorfo. A cristalinidade é formada por elevadas forças de atração intermolecular que terão que ser quebradas e dissolvidas por forma a reduzir a viscosidade, permitindo a injeção do fluido no molde.

Um dos efeitos em que terá impacto é na contração volumétrica. Entende-se por contração volumétrica a diferença de volume registada entre a fase em que o material se encontra fundido e a vítrea. Com o aumento da temperatura, as moléculas ganham energia, movendo-se em torno de umas das outras, como consequência, o volume do material aumenta. No arrefecimento, dá-se o oposto, levando à contração do material. Nos polímeros semi-cristalinos o movimento livre das moléculas é maior do que nos amorfos, e quando arrefecem tendem a organizar-se e a formar ligações próximas e fortes, contribuindo para uma maior contração.

Em polímeros amorfos como o ABS a contração situa-se no intervalo entre 0,5 – 0,8% enquanto que em polímeros semi-cristalinos como o nylon os valores poderão ser superiores a 2,5% (Kulkarni, 2010).

Outro aspeto que diferencia as duas morfologias é a temperatura de processamento (Figura 14). Os polímeros com estrutura cristalina, possuem uma temperatura de fusão, correspondente a uma quantidade de energia mais ou menos exata que deve ser fornecida para que este funda, quanto maior for o grau de cristalinidade, mais estreito é o intervalo. No caso dos polímeros amorfos, não há uma temperatura de fusão, mas sim uma gama de temperaturas

em que o material se torna suficientemente fluído e processável. No caso do ABS, por exemplo, as temperaturas recomendáveis situam-se no intervalo entre 218 e 260 °C.

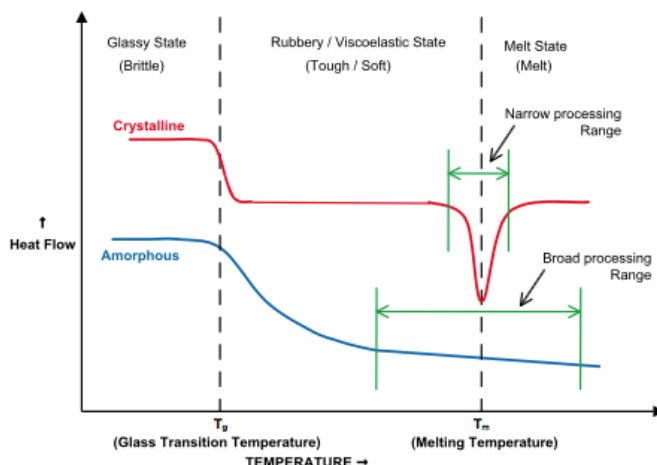


Figura 14 - Temperaturas de processamento para polímeros amorfos e cristalinos (Kulkarni, 2010)

2.6.2 Compressibilidade

Quando o polímero está exposto a uma fonte de calor, o espaço entre moléculas aumenta, assim como o seu volume específico. Caso lhe seja aplicada uma pressão o material irá comprimir. Ou seja, o volume que o material irá ocupar na cavidade do molde é dependente da temperatura e da pressão a que está sujeita. A figura 15 apresenta o efeito da compressão a várias temperaturas no polistireno através dum gráfico P-V-T. À temperatura de processamento de 250 °C, o material é comprimido de um volume específico de 1,06 cm³/g à pressão atmosférica para 0,96 cm³/g à pressão de 160 MPa. Esta grandeza de valores é aproximada ao que estará sujeito durante um ciclo de injeção, como se constata, o seu volume está sujeito a um potencial de variação na ordem dos 10% (Beamont, 2004).

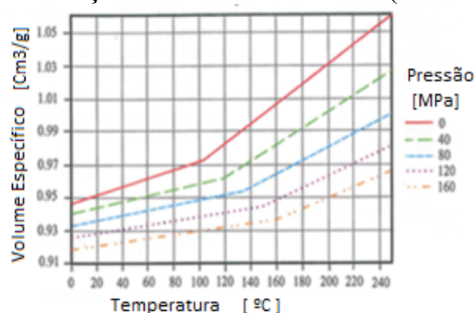


Figura 15 - Gráfico P-V-T do polistireno (Beamont, 2004)

2.7 Impacto dos Parâmetros-Chave

O processo de injeção de plástico, embora pareça de simples compreensão, é um processo complexo e dinâmico que envolve uma grande quantidade de variáveis interdependentes, obrigando a um profundo conhecimento físico das condições de processamento para uma correta interpretação dos efeitos provocados na peça (Yang *et al*, 2016). As variáveis em jogo podem ser divididas em quatro categorias: temperaturas, pressões, tempos e distâncias, ordenadas consoante a sua relevância no processo. Embora seja uma tarefa complicada controlar o processo dada a quantidade de variáveis e relações dependentes existentes, tal é possível caso os esforços sejam despendidos naquelas que têm um maior efeito na qualidade final da peça (Bryce, 1996).

Durante a fase de injeção as condições em que o material fluído entra na cavidade afetam, de sobremaneira, a qualidade da peça final, nomeadamente as suas propriedades mecânicas, como a tensão de cedência, resistência ao impacto ou a estabilidade dimensional. A velocidade de injeção é uma boa aproximação à taxa de enchimento, pelo que é um parâmetro que necessita de ser controlado.

Terminada a fase de enchimento, inicia-se a compactação, sendo a 2ª pressão um parâmetro-chave, uma vez que determinará a quantidade de material restante que entrará na cavidade. As variáveis mais importantes durante a plasticificação são a contrapressão e a velocidade de rotação do fuso, uma vez que a fusão e homogeneização do material granulado é fortemente influenciado por estes fatores.

Fora do ciclo de injeção há variáveis que precisam de ser controladas, uma vez que têm uma influência preponderante nas condições do escoamento do material e posteriormente no seu arrefecimento, como a temperatura das resistências que envolvem o cilindro, a temperatura do molde, e a pressão na cavidade, que embora não seja uma variável de entrada previamente definida, a sua evolução é um bom indicador do estado do material na cavidade, estando correlacionada com a microestrutura e qualidade final do material, Figura 16, (Yang *et al*, 2016).

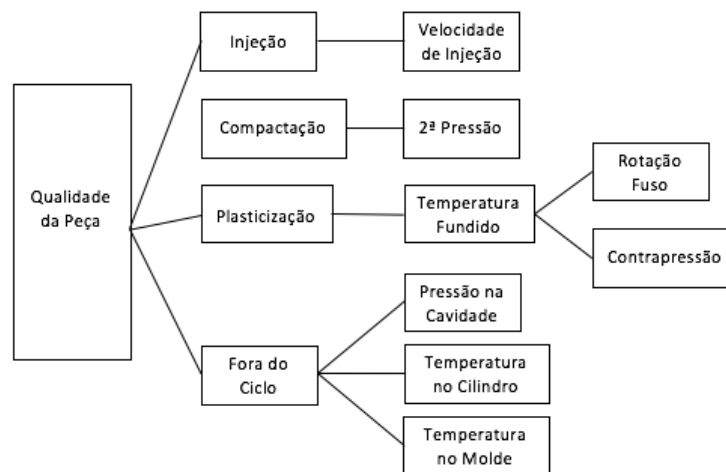


Figura 16 - Variáveis-chave no processo de injeção de plástico (Yang *et al*, 2016)

2.7.1 Velocidade de Injeção

Durante a injeção, o material fundido é forçado a entrar na cavidade do molde, que se encontra a uma temperatura inferior, perdendo calor para este de uma forma constante. A camada do fluido adjacente ao molde é a primeira a solidificar, sendo que a sua espessura é dependente do equilíbrio entre a perda de calor por condução e o ganho por fricção. Caso a velocidade de injeção seja demasiado reduzida, a camada irá solidificar totalmente impedindo que a frente de fluxo progrida dentro da cavidade, causando peças incompletas (Beamont, 2004). Com taxas de injeção mais elevadas, o calor ganho por fricção supera o calor perdido, possibilitando o total enchimento da cavidade.

Em peças com determinadas geometrias e espessuras, não é possível ter uma taxa de enchimento constante, obrigando à criação de um perfil de velocidades. Caso se pretenda produzir uma peça com formato em disco com o bico de alimentação no seu centro a uma velocidade de injeção constante, a frente de fluxo irá entrar na cavidade rapidamente. No entanto, à medida que for progredindo irá desacelerar com o aumento de volume a preencher, perdendo todo o seu calor para o molde antes do total preenchimento. Tal problema poderá ser minimizado com um perfil de velocidades, neste caso, aumentando-a gradualmente (Beamont, 2004).

A figura 17 mostra o efeito que a variação da velocidade de injeção tem na pressão e na temperatura da frente de fluxo. Como se pode constatar, não existe uma relação linear. Para velocidades de injeção elevadas as tensões de corte são elevadas, pelo que é necessária uma pressão de injeção elevada. Baixando os valores de velocidade de injeção, as tensões de corte serão menores, podendo-se baixar a pressão, no entanto a perda de calor será maior pelo que a frente de fluxo arrefecerá mais rapidamente aumentando a viscosidade. Essa combinação dos fatores temperaturas e tensões de corte levam ao formato do gráfico em U (Shoemaker, 2006).

A velocidade de injeção ideal situa-se algures entre os extremos, uma vez que tempos de injeção reduzidos aumentam a tensão de corte e por isso a pressão necessária, e tempos demasiado longos levam a um aumento da viscosidade do fluido, pelo que a pressão também deverá ser aumentada.

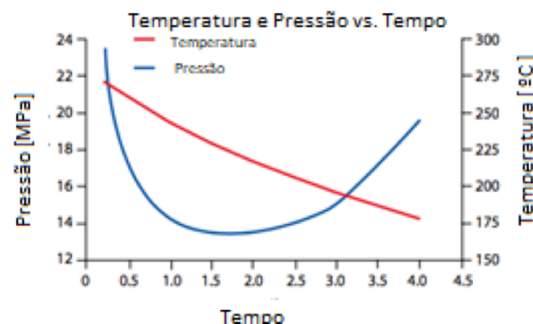


Figura 17 - Relação entre tempo-pressão-temperatura na injeção (Shoemaker, 2006)

2.7.2 Temperatura de Injeção

Desde a preparação da matéria-prima na tremonha, passando pelo cilindro até à chegada à placa de alimentação do molde que o material está sujeito a fontes de calor. Embora o seu aquecimento seja necessário, permitindo a sua conformação e uma diminuição da viscosidade no escoamento, excesso de temperatura leva a uma degradação do material.

A degradação do polímero é função do tempo e da temperatura. A temperatura a que o material é pré-aquecido na tremonha não sendo muito elevada poderá levar à degradação do material caso permaneça durante dias, afetando as suas propriedades mecânicas e de processamento. Uma unidade de injeção de dimensões desadequadas ou tempos de ciclo demasiado elevados também poderá causar deterioração, devido aos longos períodos de residência do material no cilindro. O sistema de alimentação por bicos quentes também poderá ser causador de degradação caso este esteja mal dimensionado e o material fique retido ou tenha dificuldade em escoar.

Deve-se ter especial cuidado para este problema em materiais como o PVC, polistireno, poliuretano, polycarbonato ou a poliamida (Beamont, 2004).

A figura 18 mostra o efeito da temperatura no peso final da peça e na tensão de corte. A baixas temperaturas, a pressão necessária para preencher o molde é elevada, assim como as tensões de corte desenvolvidas. À medida que a temperatura do fluido é aumentada, a tensão de corte apresenta uma redução não diretamente proporcional. O aumento da temperatura é limitado uma vez que, como referido anteriormente, valores demasiado elevados provocam degradação do material, resultando em peças com qualidade final insuficiente (Shoemaker, 2006).

Apesar de um aumento da temperatura permitir utilizar pressões mais elevadas na compactação, o peso final da peça será inferior, uma vez que haverá um aumento da contração volumétrica que não poderá ser compensado. A redução no peso da peça virá manifestada pelo aparecimento de rechupes na peça.

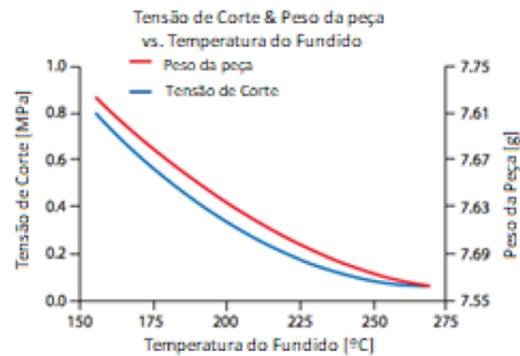


Figura 18 - Relação entre temperatura-tensão de corte-peso (Shoemaker, 2006)

2.7.3 Temperatura do Molde

A consequência de um aumento na temperatura do molde é similar ao do aumento da temperatura do fundido, com a diferença que este tem um impacto menor na pressão e na tensão de corte. A diminuição da temperatura do molde tem um maior efeito no tempo de arrefecimento do que uma diminuição equivalente na temperatura do material. Uma vantagem de um aumento na temperatura do molde nas condições de processamento, é o facto de se poder baixar a velocidade de injeção sem que a frente de fluxo solidifique antes de preencher a cavidade na totalidade (Shoemaker, 2006).

2.7.4 Tempo e 2ª Pressão

Após o enchimento da cavidade na fase de injeção, o material tenderá a arrefecer e a contrair cerca de 20 a 30% do seu volume. Caso não seja empregue a pressão de compactação a peça resultante sairá com uma geometria e um acabamento de fraca qualidade.

A contração do plástico no molde provoca vários problemas como: empeno, tensões residuais e distorção dimensional. Uma redução excessiva do volume da peça fará com que as tensões normais às faces do macho sejam elevadas, aumentando a fricção e a dificuldade na ejeção, danificando-a. A contração da peça pode levar a que esta perca o contacto com a cavidade e que caia aquando da abertura do molde, obrigando a um aumento do tempo do arrefecimento, ou pelo contrário, caso a massa adicional introduzida na compactação seja excessiva, as tensões nas faces da cavidade aumentam, podendo provocar raspados aquando da ejeção.

Os valores dos parâmetros de compactação devem ser escolhidos de tal forma que a peça perca o contato com a cavidade sem grande fricção, permaneça solidária com o macho, e que não necessite de grandes esforços ao ser ejetada (Beamont, 2004).

Shoemaker (2006) avaliou o impacto do tempo e 2ª pressão, Figura 19, na qualidade final da peça. Para isso manteve constante as condições de enchimento, tendo apenas alterado as condições de compactação. Conseguiu produzir peças com igual peso para diferentes combinações dos dois parâmetros referidos, tanto com um aumento da 2ª pressão por um período de tempo mais curto, como o oposto. Embora se tenha conseguido igualar o aspeto físico das duas peças resultantes assim como o seu peso, constatou-se que mecanicamente a peça que foi produzida com uma maior pressão de compactação obteve melhores resultados.

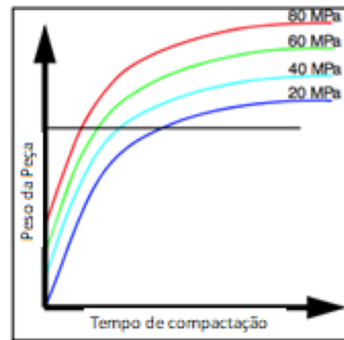


Figura 19 - Relação entre 2ª Pressão-tempo-peso da peça (Shoemaker, 2006)

2.7.5 Contrapressão e Rotação do fuso (Figura 20)

Durante a plastificação o fuso tem um movimento combinado de recuo linear e rotativo.

A contrapressão é uma força que se opõe ao recuo do fuso durante a fase de plastificação, sendo regulada por uma válvula estranguladora instalada no sistema hidráulico. Sem esta força resistente o parafuso poderia recuar de uma forma desregulada. A falta de controlo no processo iria dificultar que o parafuso atingisse a sua posição de uma forma consistente, o que levaria a variações no processo a cada injeção. Outra razão para a necessidade de utilização da contrapressão é o facto de a matéria precisar de ser compactada, eliminando assim os gases e ar existentes. Caso os gases não sejam expulsos, haverá variação no processo, aparecendo defeitos nas peças, como vazios. Os valores utilizados para este parâmetro não devem ser excessivos, sob pena de provocar degradação no material ou até desgaste no cilindro e nos componentes do parafuso.

A rotação do fuso tem como função a homogeneização da mistura. Rotações mais lentas melhoram a qualidade da mistura, mas penalizam o tempo de ciclo, devendo existir um equilíbrio ideal. Por norma, as fichas técnicas das matérias primas fornecem valores indicativos da velocidade tangencial a que podem estar sujeitos.

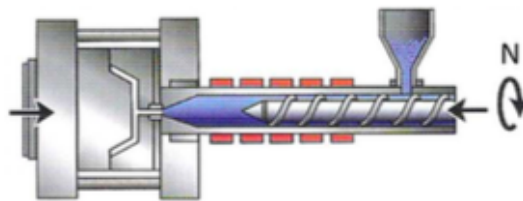


Figura 20 - Movimento do fuso na plastificação (Shoemaker, 2006)

2.7.6 Sensores de Pressão e Temperatura na Cavidade

Na máquina de injeção estão instalados sensores de temperatura e pressão. No cilindro, a pressão hidráulica no cilindro é monitorizada, assim como as temperaturas das resistências elétricas no percurso da matéria-prima desde a tremonha até aos bicos de alimentação. A instalação destes sensores na cavidade oferece um outro nível de controlo do processo. É na cavidade do molde onde a peça é produzida, pelo que, um melhor conhecimento do estado do fluido nesse local dá informação importante acerca da qualidade da peça. O comportamento do fundido obedece à curva P-V-T, e caso o seu trajeto seja semelhante a cada injeção, estar-se-á a produzir peças com qualidade de uma forma consistente. Pela interpretação da evolução da pressão na cavidade, Figura 21, ao longo do

ciclo de injeção, consegue-se identificar onde poderá estar a anomalia que provoca variação no processo.

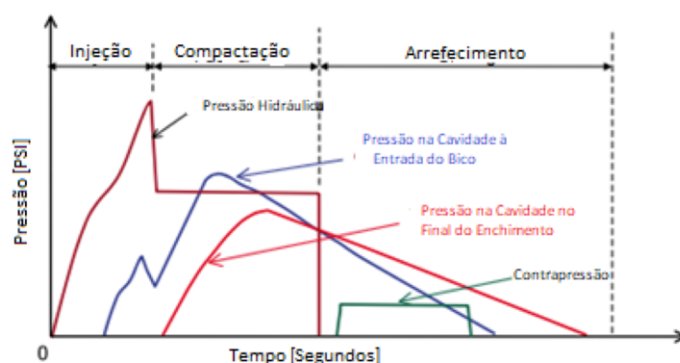


Figura 21 - Típica evolução da pressão na cavidade (Kulkarni, 2010)

2.8 Principais Defeitos Visuais (Figuras 22 e 23)

Após uma revisão bibliográfica acerca das variáveis que impactam a qualidade da peça, a máquina, o molde, o material e os parâmetros de injeção, expõem-se os defeitos visuais mais comuns. As não-conformidades identificadas têm por base artigos recolhidos que utilizaram a metodologia *DMAIC* na redução de desperdício e diminuição da variabilidade do processo fruto de causas especiais.

Alaa *et al* (2018) debruçou o seu estudo na eliminação de bolhas de ar, rebarba e manchas nas peças. Após analisar a sua problemática propôs ações de melhoria como: redução da percentagem de matéria prima reciclada, limpeza periódica do molde e a otimização dos parâmetros utilizando uma ferramenta de desenho de experiências.



Figura 22 - Rebarba (Centimfe, 2004)

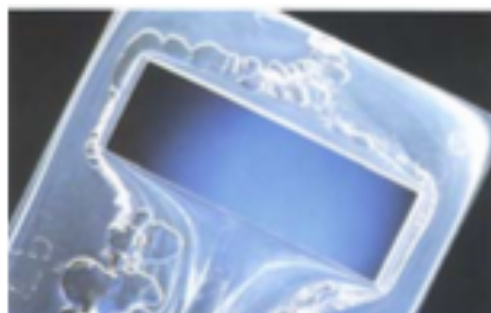


Figura 23 - Bolhas de ar (Centimfe, 2004)

Vikash *et al* (2014), Figura 24, e Vasu (2008) focaram a sua análise nos pontos pretos que insistentemente apareciam na produção. Analisaram a possibilidade da origem dos defeitos estar no desgaste da máquina ou na falta de formação e conhecimento do operador no ajuste dos parâmetros, levando a que o material carbonizasse durante a injeção. O autor do estudo propôs como medidas de melhoria a limpeza do cilindro, e do parafuso.



Figura 24 - Pontos Pretos (Vikash *et al*, 2014)

No caso de estudo de Randelovic (2015), Figuras 25 e 26, os defeitos mais recorrentes são: linhas de soldadura, peça incompleta, rechupes e rebarba. Elaborou um documento *FMEA* descriminando as possíveis causas de cada defeito assim como ações corretivas, que passaram desde a alteração de parâmetros, do material e da própria localização do sistema de alimentação.



Figura 25 - Linha de Soldadura (Randelovic, 2015)



Figura 26 - Peça Incompleta (Randelovic, 2015)

Srivastava (2005) centrou o seu estudo na melhoria do processo por via da diminuição da rejeição de peças defeituosas. Identificou o aparecimento de bolhas de ar na produção como sendo o defeito crítico. Como forma de resolução, e para evitar uma intervenção na tipologia do molde, propõe que se faça um ajuste na percentagem de material reciclado na mistura, no valor da temperatura e da pressão de injeção.

Mansur *et al* (2006) utilizaram o princípio de Pareto para identificar os defeitos que mais penalizavam a taxa de rejeição no seu caso de estudo, sendo eles: bolhas de ar, pintas, rebarba, incompletos e rechupes. No final do documento propuseram uma série de medidas com o objetivo de diminuir a sua ocorrência como: diminuição da velocidade de injeção, limpeza do molde, alteração da matéria-prima, reparação do molde, melhoria das condições de trabalho dos operadores e a sua formação, entre outras.

Tayal *et al* (2012) analisaram o impacto que as variáveis do processo de injeção provocam no seu caso de estudo e no aparecimento de raiados, queimados, incompletos e manchas. Por forma a mitigar o número de peças rejeitadas propuseram as seguintes medidas: diminuição da velocidade de injeção, aumento da dimensão dos canais de escape do molde, redução do tempo de permanência do material no cilindro, impedir o contacto da matéria-prima com agentes exteriores.

Pavlicková *et al* (2016) identificaram os defeitos pontos pretos e brilho não conforme, Figura 27, como sendo as anomalias prioritárias a corrigir no seu caso de estudo. Utilizaram

diagramas causa-efeito para melhor visualizar as possíveis causas que lhes dão origem. Após se descartarem as causas menos prováveis, propuseram as seguintes ações de melhoria: alteração no moinho que mistura a matéria-prima virgem com a reciclada e redefinição dos limites de brilho especificados.

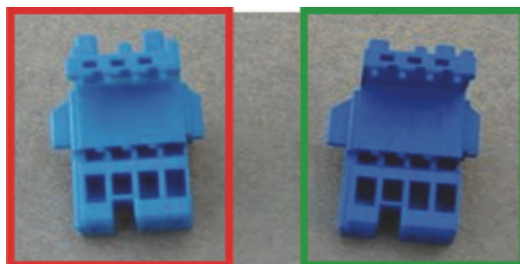


Figura 27 – Peças com diferentes brilhos (Pavlicková, 2016)

As não conformidades mais frequentes do caso de estudo de Pereira (2013) são: incompletos e raiados. Algumas das recomendações a fim de diminuir a sua frequência foram: aumentar a frequência de verificação de trabalho da máquina, limpeza de todos os equipamentos, melhorar a separação de materiais reciclados e de matérias virgens, aumentar a formação dos colaboradores, entre outras.

Kasia (2010) procurou corrigir os pontos e estrias negras que apareciam na superfície das peças produzidas, Figura 28. No final do documento recomendou um maior controlo da matéria-prima, nomeadamente, quanto à sua viscosidade, humidade e limpeza. Outras medidas foram propostas, como a criação de procedimentos de limpeza para os moinhos misturadores, assim como no maior cuidado a ter no manuseamento das peças rejeitadas, que poderão ser uma fonte de contaminação uma vez que serão recicladas posteriormente.

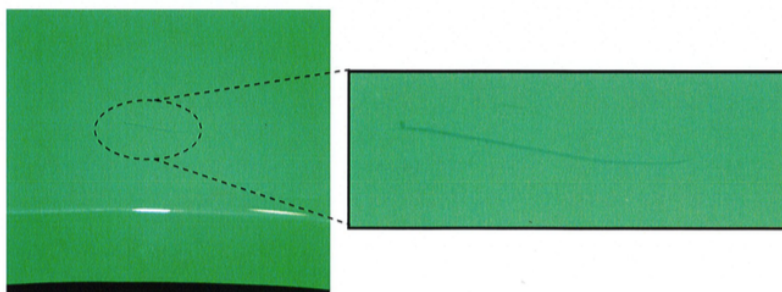


Figura 28 – Estrias negras (Kasia, 2010)

3 Metodologia

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a metodologia que será utilizada na melhoria do processo do caso de estudo do capítulo 4. É feita uma descrição sumária de cada etapa do projeto *DMAIC*, apresentando conceitos e ferramentas de qualidade relevantes. É exposto teoria sobre desenho de experiências e Taguchi, assim como casos de estudo que obtiveram bons resultados de otimização paramétrica em injeção de plástico por via desses princípios. No final do capítulo é dado a conhecer a proposta de modelo com o objetivo de diminuir a variabilidade das características-críticas de qualidade do processo.

3.2 DMAIC - Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (Figura 29)

Qualidade é inversamente proporcional a variabilidade, ou seja, quanto menor for a variabilidade das características fundamentais de um produto, maior será a sua qualidade. Tudo o que é mensurável está sujeito a variação. Equipamentos, operadores, instrumentos de medição, e até o ato de medir. Uma forma de medir a variação é conseguida através da recolha e tratamento de dados ao longo de um período de tempo. Entender o processo de uma forma aprofundada é essencial para o poder posteriormente controlar e limitar (Kent, 2016).

A filosofia Seis Sigma é uma estratégia de gestão concebida com o objetivo de melhorar a qualidade das características finais do produto (Voehl, 2014). Tem por finalidade obter processos quase perfeitos, isto é, que resultem em não mais do que 3.4 defeitos num milhão de oportunidades. Por definição, busca soluções que eliminem ou minimizem as causas da variação do processo, que devidamente implementadas, e de forma permanente, provoquem uma melhoria efetiva na sua qualidade. A abordagem Seis Sigma é orientada para projetos, ou seja, áreas que tenham oportunidade de melhoria são identificadas e alvo de uma metodologia estruturada tendo em vista a sua otimização (Bass, 2007).

A metodologia é conhecida pela sigla *DMAIC*, acrónimo das cinco etapas a seguir, Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, e pode ser utilizada em projetos que se foquem na redução do tempo de ciclo ou na eliminação de desperdício. A metodologia utiliza uma série de ferramentas em cada etapa do projeto, sendo a maioria de origem estatística (Montgomery, 2009).

Em seguida apresentam-se as diversas etapas da metodologia, assim como as principais ferramentas.



Figura 29 - Etapas da Metodologia DMAIC

3.2.1 Definir

Na primeira fase da metodologia *DMAIC*, o foco vai para a definição do projeto, identificando oportunidades de melhoria que podem estar relacionadas com redução de desperdício ou do tempo de ciclo (Allen, 2006). O projeto deve ser importante para o cliente (voz do cliente) e para a empresa. Para que o projeto seja bem-sucedido é necessário um conhecimento profundo do processo, assim como é fundamental uma correta identificação das características-críticas de qualidade (*CTQs*) do cliente (Montgomery, 2009).

Características-Críticas de Qualidade (*CTQ*)

Voehl (2014) define as características-críticas de qualidade como “*as características de um produto ou serviço que são críticas para o cliente ou para que a performance do produto ou serviço esteja de acordo com o especificado.*”

As características-críticas de qualidade representam as características-chave de um produto ou processo, mensuráveis ou atributos, cujos valores devem permanecer dentro dos limites especificados para que a satisfação do cliente seja garantida (Bass, 2007). A identificação destas características é um método de comunicação de qualidade que promove a proximidade ao cliente, um entendimento do que este quer e precisa (Montgomery, 2009).

3.2.2 Medir

Nesta fase do projeto pretende-se avaliar o estado atual do processo. Isto envolve recolher os registos existentes das características de qualidade, custos, tempos de ciclo, etc. Decidir o que e como medir, assim como que registos recolher, devendo a informação repercutir de uma forma fiel tanto quanto possível o estado corrente do processo. A capabilidade do sistema de medição, assim como do processo deve ser aferida. Para esse efeito devem ser utilizadas ferramentas estatísticas como estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade, Cartas de Controlo e Índices de Capabilidade (Allen, 2006).

Cartas de Controlo (Figura 30)

As cartas de controlo são gráficos utilizados para avaliar a evolução do processo ao longo do tempo, comparando os registos recentes com a informação histórica, o que permite tirar conclusões relativamente ao estado do processo. Se a sua variação estiver dentro de certos limites está sob controlo, caso contrário, está fora de controlo e a sua variação é imprevisível, estando o processo a ser afetado por causas especiais de variação.

Dependendo do tipo de característica que se está a monitorizar, distinguem-se dois grupos de gráficos (Roderick, 2015):

Controlo por variáveis: são mensuráveis numa escala contínua. Por exemplo, tempo, peso, distância, etc.

Controlo por atributos: são características que não podem ser medidas, servindo para determinar a presença ou a ausência de algo. Por exemplo, aceitar ou rejeitar, sucesso ou insucesso.

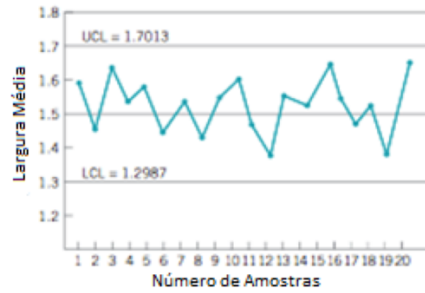


Figura 30 - Carta de controle (Montgomery, 2009)

Índices de Capabilidade

A quantificação da localização do processo e da sua variação é uma questão fundamental na aferição da qualidade das unidades produzidas. Os limites naturais de um processo são calculados pela sua variação, sendo esta estimada após todas as causas especiais terem sido eliminadas e o processo se encontrar estabilizado. Por outro lado, as especificações são tolerâncias estabelecidas pelo cliente. Diz-se que um processo é *capaz* quando a sua variação é significativamente menor do que a diferença entre a especificação superior e inferior (Roderick, 2015).

A variação do processo pode ser afetada tanto por causas comuns como especiais. Causas comuns provocam a variação natural do processo, tendo origem no *design* do equipamento, variação natural do material, aparelho de medição, etc. As causas especiais, ou assinaláveis, provocam uma alteração brusca no processo, não sendo fácil na maioria das vezes identificar a sua origem, podendo a sua causa ser o operador não qualificado, condições ambientais extremas, material com características técnicas fora do especificado, falha técnica no equipamento, etc (Montgomery, 2009).

Pode-se definir a capacidade do processo como a sua aptidão para produzir peças de acordo com o especificado, sendo avaliada pelos seus índices C_p e C_{pk} (Bayeux, 2001).

O índice de capacidade potencial é definido pela seguinte expressão:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (3.1)$$

Este índice compara a variabilidade do processo com os limites especificados, devendo o seu valor ser superior a 1,33 para que o processo tenha potencial para ser capaz. Como se pode observar pela fórmula (3.1), esta não tem em consideração a média do processo nem o seu desvio face ao valor nominal.

Para aferir a localização do processo, foi desenvolvido o índice C_{pk} , capacidade efetiva, dado pela expressão:

$$C_{pk} = \min (C_{pu}, C_{pl}) \quad (3.2)$$

onde:

$$C_{pu} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (3.3)$$

$$C_{pl} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (3.4)$$

Este índice considera a localização do processo (μ), sendo determinado pelo quociente da menor distância entra a média do processo e um dos limites de tolerância (mais próximo) e a metade da variação natural do processo.

3.2.3 Analisar

Nesta fase do projeto o objetivo é utilizar os registos recolhidos na fase anterior, analisando e determinando as relações de causa-efeito no processo, compreendendo as diferentes fontes de variação. Pretende-se identificar as potenciais causas que dão origem aos defeitos, problemas de qualidade ou insuficiências do processo que motivaram o início do projeto. Devem-se distinguir os tipos de fonte de variação em causas comuns e assinaláveis (ou especiais) que provocam cada defeito. As primeiras são intrínsecas, fazem parte da natureza do processo, enquanto que as causas assinaláveis, por norma, têm origem em fontes externas. A remoção das causas comuns geralmente envolve alterações no processo, enquanto que a remoção de causas assinaláveis implica eliminar um problema específico.

Documentos como *FMEA*, gráficos de Pareto e diagramas de Ishikawa são úteis nesta fase (Montgomery, 2009).

Gráfico de Pareto (Figura 31)

A construção de um gráfico de Pareto envolve a tabulação dos diferentes tipos de não-conformidades geradas numa produção. É uma ferramenta útil que permite uma rápida visualização e identificação dos defeitos que ocorrem com uma maior frequência, orientando os esforços para as causas que lhes dão origem (Montgomery, 2009). A análise de Pareto tem por princípio que 80 por cento dos problemas tem origem em 20 por cento das causas, ou seja, eliminando as principais causas consegue-se um elevado ganho.

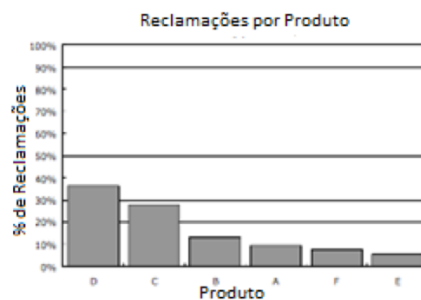


Figura 31 - Gráfico de Pareto (Kent, 2016)

Diagrama de Ishikawa (Figura 32)

O diagrama de Ishikawa, também conhecido por diagrama de causa-efeito é uma ferramenta gráfica simples, mas ao mesmo tempo poderosa na identificação das fontes de variação. A sua utilidade é independente da sua complexidade, permitindo que o seu utilizador construa e visualize de forma rápida os fatores que estão a interferir no processo. É habitual começar a sua construção com os seis elementos seguintes: operador, máquina, método, material, sistema de medição e ambiente (Roderick, 2015)

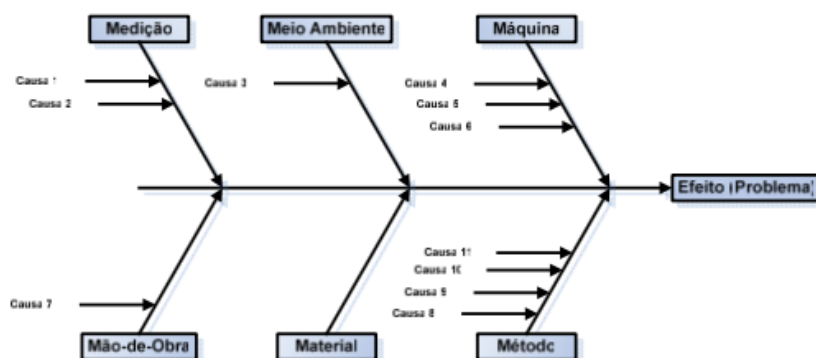


Figura 32 - Exemplo de diagrama Ishikawa

3.2.4 Melhorar

Nas fases anteriores o foco esteve na identificação do potencial de melhoria de um processo, na recolha e tratamento de dados, assim como na sua análise, procurando determinar as fontes de variação com maior influência na perturbação do processo (Montgomery, 2009). Na fase de melhoria é exigido um pensamento criativo acerca das alterações que poderão ter o impacto pretendido na melhoria do desempenho do processo. É nesta fase que ferramentas estatísticas como Desenho de Experiências (DoE) devem ser aplicadas, tendo em vista a otimização do processo, ou seja, com base nessa técnica devem-se conduzir experiências que determinem a melhor conjugação de parâmetros que minimizem a variação das características-críticas de qualidade (Pyzdek, 2003).

No subcapítulo seguinte será abordada fundamentação teórica sobre Desenho de Experiência, assim como o método proposto.

3.2.5 Controlar

Na última fase do projeto *DMAIC* o objetivo passa por avaliar se as medidas propostas estão a ser implementadas e se estão a produzir uma melhoria efetiva no processo. As alterações são documentadas e a evolução do processo deve ser monitorizado, nomeadamente, através de cartas de controlo.

3.3 Desenho de Experiências

Desenho de Experiências (DoE) é uma técnica estatística que consta em planear e executar experiências, utilizada na análise de problemas de qualidade e na melhoria de processos.

Um processo pode ser visto como um sistema que está sujeito a um conjunto de variáveis de entrada (fatores) que dão origem a variáveis de saída (caraterísticas de qualidade). As variáveis de entrada distinguem-se entre controláveis e não-controláveis. As primeiras podem ser alteradas como, pressões, temperaturas, tempos, etc. Enquanto as variáveis não-controláveis provocam ruído ao processo e são difíceis de controlar, exemplos disso são, condições ambientais como humidade e temperatura ou a variação nas propriedades da matéria-prima a transformar. As variáveis de saída são as características de qualidade que são utilizadas para aferir a qualidade do produto (Montgomery, 2009), Figura 33.

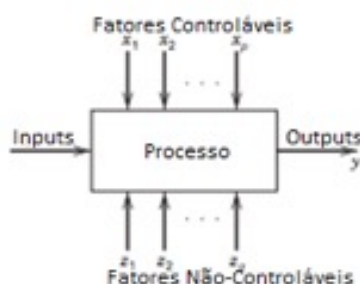


Figura 33 - Modelo geral de um processo (Montgomery, 2013)

O DoE é bastante útil em identificar as variáveis do processo que têm um maior impacto nas características de qualidade. Apresenta uma abordagem sistematizada e planeada na alteração dos fatores de entrada, determinando o efeito que têm nas variáveis de saída. Estatisticamente tem um papel fundamental na redução da variabilidade das características de qualidade e na determinação dos níveis dos fatores controláveis que otimizam o desempenho do processo (Montgomery, 2013).

Esta estratégia planeada substituiu a abordagem tradicional muitas vezes seguida de alteração de um fator de cada vez. A grande desvantagem em avaliar o impacto dos fatores

individualmente, para além da sua baixa eficiência é ignorar as possíveis interações existente entre fatores. Há interação quando o efeito provocado na resposta pela alteração do valor de um dos fatores estiver dependente do nível do outro fator. Na figura 34 apresenta-se a interpretação gráfica da existência deste efeito, havendo interação quando as linhas dos dois níveis do fator B não se encontram paralelas.



Figura 34 - (a) Experiência sem Interação (b) Experiência com Interação (Montgomery, 2009).

3.3.1 Taguchi

A abordagem de Desenho de Experiências pelo método convencional, também conhecido por fatorial completo, avalia o efeito que cada um dos fatores e dos seus níveis provocam na resposta através de matrizes que contemplam todas as combinações possíveis. Neste tipo de método estatístico as experiências são organizadas em matrizes ($n \times m$), denominadas por matriz experimental. Cada coluna (m) da matriz corresponde a um fator diferente, ao passo que cada linha (n) corresponde a uma experiência de níveis atribuídos a fatores únicos.

A dimensão da matriz está condicionada pelo número de fatores e de níveis escolhidos, sendo o número total de experiências necessária dado pela expressão:

$$n^{\circ}\text{experiencias} = n^{\circ}\text{de níveis} \times n^{\circ}\text{de fatores} \quad (3.5)$$

Uma vez que o número de experiências necessário a realizar aumenta exponencialmente com o número de fatores estabelecido, torna-se difícil e dispendioso aplicar o método convencional para um elevado número de fatores e níveis.

Por forma a diminuir a quantidade de experiências necessárias, em que nalguns casos se tornaria impraticável, Taguchi desenvolveu matrizes ortogonais, que caracterizam a sua abordagem no Desenho de Experiências. A propriedade ortogonal das suas matrizes significa que cada coluna está balanceada, isto é, cada coluna tem um número igual de níveis dispostos de uma forma ordenada, o que assegura que cada nível de cada fator tenha uma oportunidade equivalente de influenciar os resultados. Existe também um balanceamento entre colunas, ou seja, a combinação de níveis entre colunas estão em igual número, o que assegura que todas as possíveis combinações de fatores existem em igual número (Roy, 2001).

Uma outra inovação de Taguchi, é a forma como este trata os resultados. A maneira mais usual de se comparar diferentes soluções é através da média simples. Acontece que esta forma de análise ignora a variação dentro do grupo. Para contornar este problema, Taguchi propõe que os resultados sejam comparados por via de uma medida conhecida por média-desvio padrão (MSD), que para o objetivo de tornar a característica de qualidade *Nominal Melhor* é dado pela expressão:

$$MSD = \frac{(y_1 - y_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (y_n - y_0)^2 \dots}{n} \quad (3.6)$$

Em que y_0 é o valor pretendido a atingir e y_n o resultado da medição obtido.

Esta forma de aferir o desempenho de uma experiência tem a vantagem de contabilizar a média e o desvio padrão em simultâneo. Para facilitar a interpretação dos resultados, é feita uma transformação dos valores para escala logarítmica, obtendo-se um rácio designado por

sinal-ruído que se pretende maximizar, pois tal significa que a média-desvio padrão estará a ser minimizada e a resposta com menor variação em redor do valor nominal está encontrada.

A razão sinal-ruído é dada em decibel e é obtida pela seguinte expressão:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} MSD \quad (3.7)$$

3.3.2 Desenho de Experiências em Injeção de Plástico

Como referido no capítulo 2.8 existem inúmeros defeitos visuais que na maioria dos casos de estudo consultados são resolvidos por via de intervenções no molde, na máquina ou no material. Para se perceber o impacto que os parâmetros de injeção têm nas características de qualidade contínua e de que forma é que estas poderiam ser otimizadas, analisaram-se vários documentos científicos que tiveram por base a aplicação de desenho de experiências.

Henderson *et al* (2006) investigaram o impacto que os parâmetros tempo de arrefecimento, contrapressão e plastificação têm no tempo de ciclo do seu processo, com o objetivo de o diminuir. Utilizaram dois níveis para cada fator e cada experiência foi repetida três vezes, monitorizando o tempo de ciclo e defeitos visuais como rebarba e incompletos. Utilizando o software Matlab, avaliaram a significância dos parâmetros e as interações existentes através de uma análise ANOVA. No final do estudo conseguiram reduzir o tempo de ciclo em 6,92 segundos concluindo que o fator que tinha maior influência era o tempo de arrefecimento.

Moita (2007) desenvolveu um método com o objetivo sistematizar a otimização dos parâmetros de injeção na fase de ensaios dos moldes para diferentes respostas: peso da peça, controlo dimensional e inspeção visual com tempo de ciclo. Numa primeira fase utilizou uma matriz L_{12} com seis fatores: pressão de injeção, velocidade de injeção, temperatura de injeção, segunda pressão, tempo de arrefecimento e tempo de segunda pressão. De seguida, determinou os fatores com maior impacto por via de uma análise de variância. Através de uma matriz L_{16} aferiu se o comportamento dos parâmetros era ou não linear. Utilizando uma matriz L_9 faz a “afinação” dos fatores mais significantes a três níveis. No final do estudo conseguiu encontrar regulação paramétrica para os diferentes casos de estudo com objetivos distintos, minimização do peso da peça, maximização da qualidade visual e ter a espessura no seu valor nominal.

Chen *et al* (2016) estudaram a combinação de parâmetros de injeção que melhor serviam o comportamento da peça quanto ao empeno. Identificaram os parâmetros com maior influência através de um processo hierárquico analítico, auscultando e entrevistando profissionais entendidos em injeção de plástico. Serviram-se de uma matriz ortogonal L_9 para acomodar quatro fatores, pressão de injeção, 2ª pressão, tempo de segunda pressão e temperatura do molde a três níveis cada. Posteriormente, através da medição da razão sinal-ruído (S/N) para a característica *Menor Melhor* encontraram os níveis para os fatores que minimizavam o empeno.

Kavade *et al* (2012) no seu estudo pretendiam desenvolver um método que minimizasse o peso das peças produzidas, mantendo-o dentro do intervalo especificado. O material escolhido para o efeito foi o polipropileno (PP), dado ser dos materiais mais utilizados na indústria dos plásticos. A matriz ortogonal escolhida para o efeito foi a L_{18} , num total de dezoito experiências, sendo que em cada experiência foi registado o peso, defeitos visuais e tempo de ciclo. Os fatores considerados foram: temperatura do cilindro, pressão e velocidade de injeção, taxa de arrefecimento, pressão de compactação, tempo de 2ª pressão e tempo de arrefecimento. Conseguiu-se uma otimização do processo, minimizando o peso das peças assim como do tempo de ciclo.

Mehat *et al* (2011) propõem um método de otimização para problemas de múltipla resposta. O desenho de experiências utiliza uma matriz ortogonal L_9 onde insere quatro fatores controláveis, cada um a três níveis, temperatura de alimentação, pressão de

compactação, tempo de injeção e de 2ª pressão. As respostas que pretende melhorar são propriedades mecânicas, módulo de flexão e resistência à flexão. Numa primeira análise avalia a razão sinal-ruído para a característica *Maior Melhor* isoladamente para cada uma das respostas, e por fim, combina as razões obtidas somando-as. Os resultados foram satisfatórios, tendo-se consigo melhorar simultaneamente o módulo de flexão e a resistência à flexão.

Chen *et al* (1997) no seu caso de estudo pretendem eliminar a existência de raiados nas peças produzidas. Após sessões de *brainstorming* concluíram que tal problema poderia ser eliminado caso as tensões de cisalhamento entre a parede do molde e a peça fossem minimizados, em simultâneo com o gradiente de temperaturas na peça. Numa primeira análise, através de uma matriz ortogonal L_{12} analisaram a significância de fatores, cada um a dois níveis, para cada uma das respostas. Após terem encontrado os fatores com maior impacto passaram para a experiência de otimização, utilizando uma matriz ortogonal L_{18} com oito fatores a três níveis. A combinação paramétrica ideal foi obtida pela soma das razões de sinal-ruído em cada resposta para uma característica *Menor Melhor*. No final do estudo foi conseguida uma melhoria na qualidade das peças produzidas, eliminando o problema dos raiados.

3.3.3 Método

O método proposto tem como objetivo sistematizar a forma como a otimização da regulação dos parâmetros de injeção é executada tendo em vista a produção de peças de boa qualidade de uma forma consistente. Assenta nos pressupostos de Desenho de Experiências, e mais concretamente em Taguchi, pretendendo-se que seja uma ferramenta aplicável a qualquer molde em produção de série. A estrutura experimental proposta foi baseada no método desenvolvido por Moita (2007) com as devidas alterações face aos objetivos pretendidos neste trabalho. Nomeadamente, precaveu-se para a possibilidade do problema ser de múltipla resposta ou do molde ser de múltipla cavidade. A escolha pelo método deste autor deveu-se ao facto da semelhança existente entre o tipo de respostas que se pretende otimizar e à lógica seguida na sequência experimental. Não sendo complexa, oferece segurança ao utilizador uma vez que se inicia a análise considerando um número razoável de fatores, seis, e a otimização ser executada variando quatro parâmetros a três níveis, conferindo fiabilidade ao método.

Segue-se a explicação da estrutura sequencial, Figura 35, em que cada fase tem os seus objetivos pré-definidos, e o seu avanço está dependente da análise dos resultados obtidos na fase anterior.

Numa primeira instância, escolhido o caso de estudo, selecionam-se as respostas do processo de injeção que se pretendem melhorar, podendo ser de resposta simples ou múltipla. As respostas devem ser variáveis contínuas, como por exemplo: peso, brilho ou dimensão.

Na segunda fase o utilizador deve identificar os fatores controláveis que considere ter um maior impacto nas respostas em estudo. Deverá selecionar seis fatores, sendo que a escolha destes ficará ao seu critério. Os fatores irão integrar uma matriz ortogonal L_{12} a dois níveis cada. A definição do valor dos níveis *baixo* e *alto* deve ser tal que provoque um efeito observável na resposta. Recomenda-se utilização dos valores limite admissíveis para afinação da máquina estabelecidos na ficha de parâmetros do molde.

Na terceira fase, utilizando o resultado obtido da matriz de experiências L_{12} procede-se ao *screening* das variáveis. Ou seja, dos seis fatores escolhidos inicialmente, identificam-se os quatro que têm um maior impacto na resposta fazendo uso de uma análise ANOVA. Devem ser consideradas e analisadas relações de interação entre fatores.

A quarta fase é de otimização. Nesta experiência consideram-se os quatro fatores anteriormente identificados a três níveis cada com três repetições. A amplitude dos valores escolhidos deve ser diminuída face à fase anterior. O aumento de dois para três níveis serve para prevenir não-linearidades no processo. A matriz ortogonal utilizada nesta fase é L_9 .

Na quinta fase analisam-se as razões sinal-ruído para a característica de qualidade *Nominal Melhor* obtida para cada resposta. A combinação paramétrica ótima, que poderá ser nenhuma das experimentadas, é aquela que maximiza os quocientes sinal-ruído.

Na sexta fase do método, o molde deverá ser ensaiado com a combinação de parâmetros de injeção obtida, atestando se tal alteração provoca uma melhoria no processo.

Caso o problema seja de múltipla resposta, haverá uma sétima fase. Os quocientes S/N das soluções ótimas devem ser comparados, recaindo a escolha final por aquela que maximiza o S/N_{total} .

Caso os resultados não tenham sido favoráveis, o utilizador deve reiniciar o ciclo desde a fase quatro refinando os valores dos níveis.

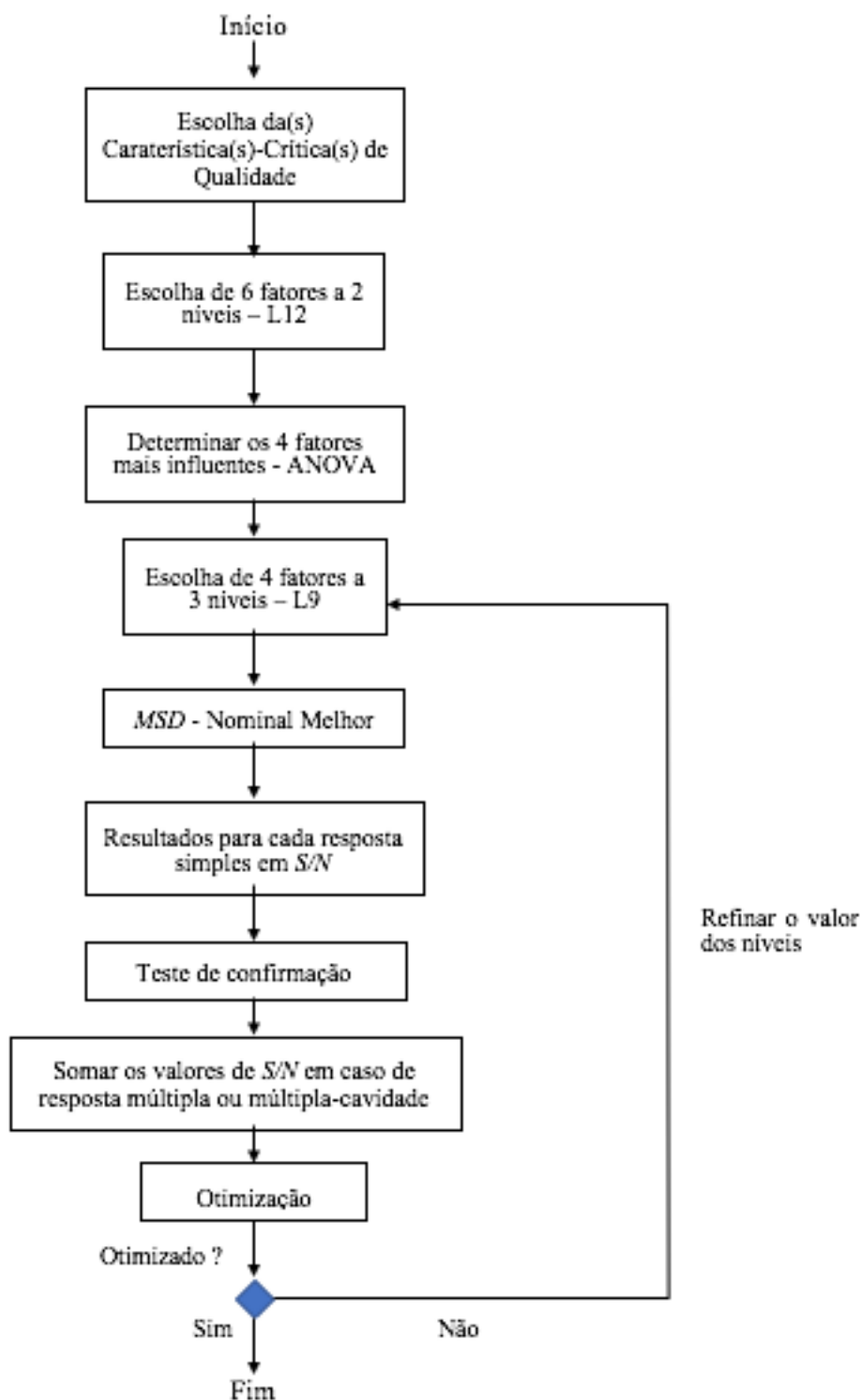


Figura 35 - Estrutura experimental do método

4 Caso de Estudo

4.1 Introdução

Neste capítulo é aplicada a metodologia *DMAIC* e o método Taguchi a um caso de estudo, o molde MO6490. A metodologia seguida servirá para identificar e analisar as fontes de perturbação exterior, propondo ações de melhoria que ajudem a eliminar os seus efeitos. O método de Taguchi aplicado terá como finalidade encontrar a combinação paramétrica que leve à otimização do processo e das características-críticas de qualidade.

4.2 Aplicação Metodologia *DMAIC*

O presente projeto foi desenvolvido com a expectativa de reduzir a taxa de rejeição de um molde em produção de série. Para melhor tratar o problema de forma a reduzir o número de não-conformidades optou-se por se fazer uso da metodologia *DMAIC*. Esta abordagem permite uma análise cuidada e sistematizada em relação às causas dos defeitos e respetiva resolução. Juntamente com as ações propostas no final do projeto, tendo em vista a mitigação do efeito das fontes exteriores de variação, o molde identificado como tendo potencial de melhoria será sujeito ao método de otimização paramétrica proposto no capítulo 3.

4.2.1 Definir

A primeira etapa do projeto consiste na identificação da oportunidade de melhoria, assim como na delineação das metas a atingir. Para esse efeito é necessário ter sensibilidade e conhecimento relativamente aos processos desenvolvidos na empresa. A definição do problema deverá ser alicerçada na vontade e nos requisitos do cliente cujas expectativas devem ser totalmente satisfeitas.

Faz parte da cultura e dos valores da Simoldes Plásticos o conceito de gestão da qualidade “Zero Defeitos”. Esta teoria pressupõe a inexistência de qualquer desperdício num processo. Os elementos não produtivos do processo sejam, ferramentas, operadores, ou outros, devem ser identificados e corrigidos. A empresa ao alcançar o nível de zero defeitos no seu processo produtivo reduz os custos e aumenta a satisfação do cliente.

Em termos estatísticos e daquilo que são as diretrizes da filosofia Seis Sigma, ter um processo com zero defeitos significa que este tenha 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (PPM), correspondendo a um nível Sigma de seis.

Conseguir que o processo não tenha qualquer não-conformidade é uma tarefa difícil de atingir, no entanto, é o objetivo que qualquer colaborador deve ter em mente. Na SP o número máximo de PPM permitido num processo é de 8.000, correspondendo a um nível Sigma próximo de 3,9. A partir destes valores o processo é considerado crítico e terão que ser analisadas e implementadas ações que o corrijam.

A escolha do molde para estudo teve por base dois critérios: a taxa de rejeição em PPM, que como referido tem o seu limite superior estabelecido em 8.000, e a quantidade de peças produzidas. Uma vez que o potencial de ganho em produções com volumes elevados é maior.

O molde que servirá de objeto de análise é o MO6490, com produções mensais acima das 25.000 peças, necessitando de diminuir o número de peças produzidas com defeito.

Tabela 1 - Quantidade de peças produzidas e rejeitadas nos meses de estudo

MO6490		
Data	Quantidade	PPM
Fevereiro	31 418	8 116,37
Março	25 898	12 510,62
Abril	27 690	7 511,74
Maior	31 996	8 876,11

O período de análise foram os meses de fevereiro, março, abril e maio de 2018, Tabela 1. Como se pode observar pelo gráfico da figura 36, apenas no mês de abril a produção não ultrapassou o limite da taxa de rejeição, tendo o pico ocorrido no mês de março, com valores à volta dos 12.500 ppm.

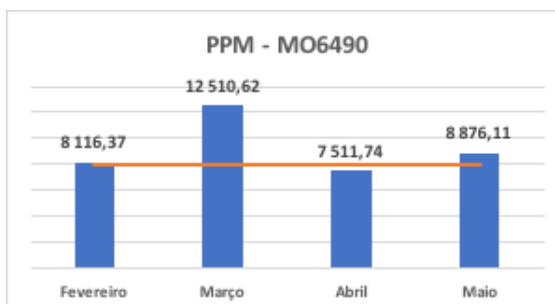


Figura 36 - Evolução PPM do molde M6490 no período em análise

O molde trabalha apenas numa máquina, na EN 400 XIV de 400 toneladas força, Figura 37, dividindo o tempo de produção disponível com o seu molde “irmão” MO6547, que tem apenas algumas alterações face a este.



Figura 37 - Máquina EN 400 XIV

O MO6490 é constituído por duas cavidades, Figuras 38 e 39, sendo que os movimentos moldantes são mecânicos.

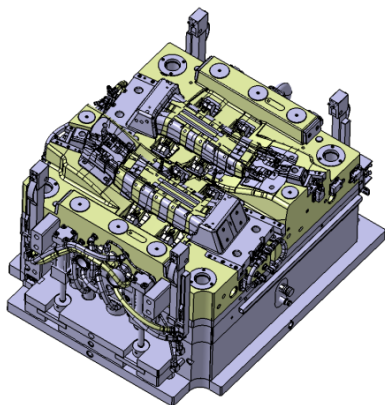


Figura 38 - Macho

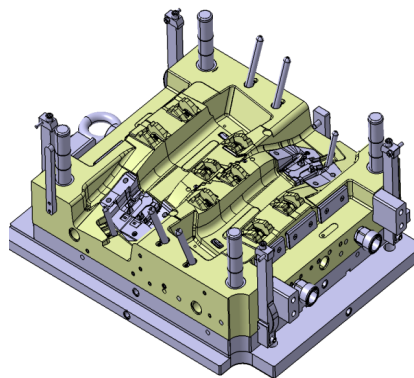


Figura 39 – Cavidade

As peças produzidas por este molde, Figuras 40 e 41, são utilizadas no interior do automóvel no chamado pilar B, situado na zona do cinto de segurança, correspondendo cada cavidade ao respetivo lado, esquerdo e direito.



Figura 40 - Parte superior da peça



Figura 41 - Parte inferior da peça

Partindo dos requisitos percebidos pelo cliente definiram-se as características críticas de qualidade. Estas são as características que associam as métricas que devem ser acompanhadas ao longo do projeto, procurando melhorá-las. A identificação dessas características fundamentais teve por base o trabalho que é desenvolvido no Controlo Estatístico do Processo (CEP). Diariamente e em cada produção são monitorizadas pelo departamento de Qualidade três características: o peso da peça, cota dimensional e o brilho. Com o histórico das medições é possível analisar e avaliar as variações existentes no processo.

No contexto deste documento considera-se excessivo o controlo e a melhoria de três características contínuas, pelo que, resolveu-se preterir o brilho por uma variável discreta, os defeitos visuais. Considera-se por defeito visual qualquer não-conformidade na peça produzida que seja detetável à vista desarmada.

Este projeto tem como foco a melhoria da qualidade das peças produzidas, Figura 42. Essa qualidade será garantida caso os valores do peso e da cota index flutuem o mínimo possível em torno do valor nominal requerido pelo cliente, assim como, em simultâneo seja conseguido um aspeto visual perfeito.

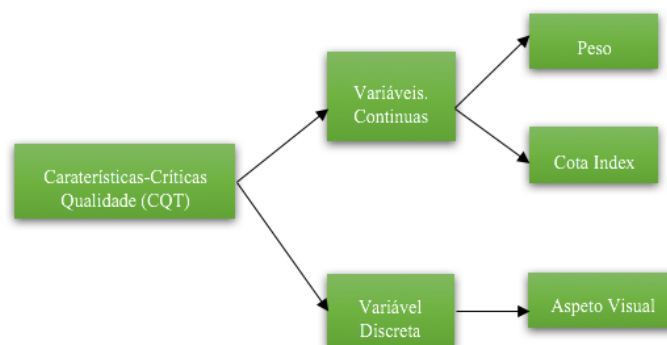


Figura 42 - Características-Críticas de Qualidade (CQT)

4.2.2 Medir

Nesta fase é necessário quantificar as métricas identificadas na etapa anterior. Foram recolhidos os registos existentes referentes à produção do molde MO6490 nos meses em estudo para as características-críticas de qualidade mesuráveis: peso e cota índice de cada cavidade. Recorreu-se a cartas de controlo e aos índices de capabilidade para aferir o estado atual do processo e à sua evolução de fevereiro a maio de 2018. O comportamento da máquina foi verificado através dos estudos de capabilidade mais recentes. As capacidades dos sistemas de medição foram também aferidas.

Em cada produção a metrologia é responsável por recolher três injeções e regista os valores das características de qualidade, verificando se o processo se encontra sob controlo.

Na tabela 2 apresentam-se os valores especificados e limites superior e inferior da cota índice e do peso das peças do molde MO6490, sendo que estes são idênticos para as peças produzidas nas duas cavidades.

Tabela 2 – Valores limite e especificados para o peso e cota índice

MO6490			
Caraterística	Limite Inferior	Limite Superior	Especificação
Peso (g)	377,10	416,90	397,00
Cota Index (mm)	319,00	321,00	320,00

As cartas de controlo das características para cada uma das cavidades encontram-se no anexo A. Fazendo uma análise superficial do que foi a evolução do peso das peças ao longo do período de estudo, constata-se que durante o mês de abril houve um maior afastamento relativamente ao valor nominal, o que indicia que o processo tenha sofrido algum tipo de perturbação. Relativamente à cota índice, verifica-se que esta nunca atinge o valor especificado, estando os seus valores sempre abaixo deste.

Por forma a ter uma perceção mais exata do estado do processo calcularam-se os índices de capabilidade C_p e C_{pk} para cada mês (Tabela 3). O índice de capabilidade potencial C_p somente avalia a variabilidade do processo, ao passo que o índice de capabilidade C_{pk} tem em conta tanto a variação como a sua centragem, devendo ambos os índices serem superiores a 1,54 para que o processo seja considerado capaz, em tamanhos de amostra reduzida (30).

Tabela 3 – Índices de capacidade das características-críticas das duas cavidades

MO6490					
CAV 1	Mês	Fev	Mar	Abr	Maio
	Caraterística	Cp			
	Peso (g)	5,46	9,04	3,78	4,36
	Cota Index (mm)	3,60	2,94	3,75	3,77
	Caraterística	Cpk			
	Peso (g)	4,94	8,72	3,04	3,91
CAV 2	Mês	Fev	Mar	Abr	Maio
	Caraterística	Cp			
	Peso (g)	6,12	6,23	2,49	2,97
	Cota Index (mm)	2,80	3,31	2,93	4,29
	Caraterística	Cpk			
	Peso (g)	5,74	6,15	2,07	2,87
	Cota Index (mm)	0,92	0,94	1,17	1,76

Para a resposta peso todos os índices têm um valor superior ao necessário, no entanto, constata-se que existe uma diferença entre os C_p e os C_{pk} correspondentes, o que evidencia que a resposta nunca esteve centrada e que existe um potencial de melhoria. De referir que o comportamento do processo no que ao peso diz respeito foi claramente melhor no mês de março, tendo decaído no mês seguinte, com o valor do C_{pk} de apenas 2,07 no mês de abril para a característica peso da cavidade dois.

Quanto à resposta cota index, verificou-se um desempenho mais fraco, tendo inclusive o valor do C_{pk} para a cavidade 2 sido inferior ao limite nos meses de fevereiro, março e abril. De igual forma que sucedeu com a resposta peso, os desempenhos dos índices correspondentes nunca foram iguais, o que evidencia que a dimensão não esteve centrada relativamente ao valor nominal especificado.

A capacidade das máquinas é avaliada semestralmente. Para isso são executados ensaios de capacidade, que consistem em validar o comportamento da máquina por via de três parâmetros considerados fundamentais: tempo de injeção, curso da almofada e peso da injeção. São produzidas trinta injeções e em todas elas os parâmetros em análise terão que estar dentro das tolerâncias normalizadas. O ensaio de capacidade da máquina 400 XIV foi realizado com o molde “irmão” MO6547, tendo o resultado dado OK, Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado ensaio de capacidade da máquina EN400 XIV

Nº Molde	Máquina	Data	Parâmetro	Nominal	Tol Inf	Tol Sup	CP	Cpk	Cpk
6547	EN400 XIV	15/05/17	Tempo Injeção (s)	4,2	3,2	5,2	58,34	52,82	OK
			Curso da Almofada (mm)	18	13	23	6,3	2,67	OK
			Peso (gr)	392,02	372,4	411,6	53,13	53,13	OK

As peças foram pesadas com uma balança KERN 572 com uma precisão à décima da grama e medidas com um paquímetro Mitutoyo com uma precisão à décima de milímetro e um alcance de 400 mm.

4.2.3 Analisar

Nesta fase é importante analisar, identificar e explorar cada fonte de variação detetada, realizando uma estimativa de qual será o impacto que pode ser causado através da execução das ações de melhoria. Fez-se uso do princípio de Pareto para identificar os “poucos vitais” responsáveis por 80 por cento dos defeitos nas peças produzidas. Com base na bibliografia recolhida, sessões de *brainstorming*, documentos internos como *FMEA* e conversas informais foi possível uma transmissão de conhecimento e de experiência, facilitando a identificação e compreensão da natureza das fontes de variação. Construíram-se diagramas de Ishikawa para uma melhor visualização das relações causa-efeito para as não-conformidades mais frequentes, sintetizando o conhecimento adquirido.

Para efeito de contabilização interna dos defeitos em PPM são consideradas tanto as peças defeituosas recolhidas no arranque, como na produção propriamente dita. Entende-se por arranque a fase que dá início à produção, altura em que o operador insere os parâmetros

de injeção a partir da ficha de parâmetros do molde, afinando-os caso seja necessário até estabilizar a máquina e que peças conformes sejam produzidas. Este trabalho foca-se na eliminação de desperdício durante a produção.

Na tabela 5 encontram-se os valores de potencial de melhoria estimados. Aos PPM totais são retirados os valores correspondentes ao arranque de produção, sendo que desses se procurará reduzir 80 por cento do desperdício. Na última coluna, o potencial de melhoria foi estimado pela diferença entre os valores totais e os que serão objeto de análise. O estudo teve início em maio, pelo que não será possível reverter os custos das perdas nos meses anteriores. No entanto, esta estimativa serve para ter uma noção do que poderia ser poupado, caso fossem tomados ações de forma atempada.

Tabela 5 – Potencial de melhoria do molde M06490

M06490				
Data	PPM			
	Total	s/ Arranque	Análise - 80%	Potencial Melhoria
Fevereiro	8116,37	5188,11	4150,49	3965,88
Março	12510,62	7645,38	6116,30	6394,32
Abril	7511,74	4983,75	3987,00	3524,74
Maior	8876,11	6750,84	5400,68	3475,43

As intenções do estudo recaem sobre os defeitos que têm um maior impacto no desperdício total durante a produção. A identificação do tipo de não-conformidade responsável por 80 por cento das rejeições foi determinada através de gráficos de frequência acumulada.

No mês de fevereiro os tipos de defeito que tiveram uma maior preponderância no total de peças rejeitadas foram as pintas e as manchas, tendo-se contado 80 e 53, respetivamente, Figura 43.

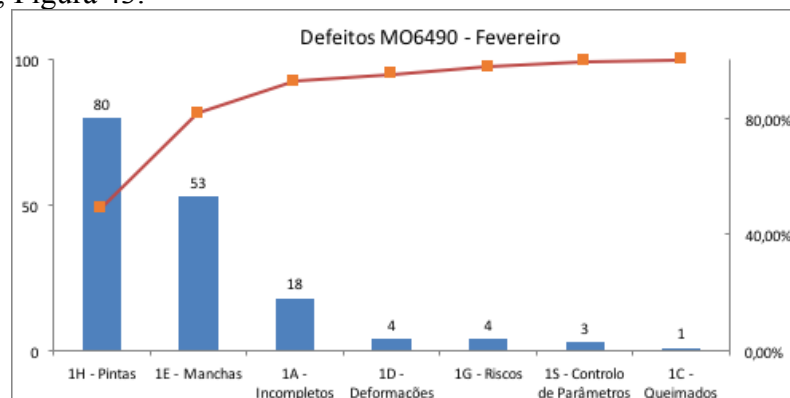


Figura 43 - Gráfico de Pareto do molde M06490 do mês de Fevereiro

No mês de março, a juntar às pintas e às manchas também se produziram peças com riscos, de quantidades 87, 37 e 36, respetivamente, Figura 44. Em menor quantidade, peças incompletas e com gorduras foram rejeitadas.

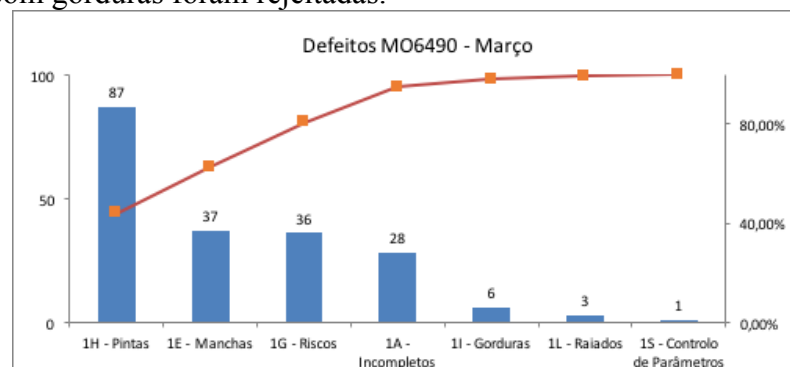


Figura 44 - Gráfico de Pareto do molde M06490 do mês de Março

Em abril, o número de peças incompletas aumentou significativamente tendo sido o defeito mais recorrente, Figura 45. Produziram-se peças com raiados, algo que não tinha sucedido com expressão nos meses analisados. Os outros defeitos que somados perfazem os 80 por cento de frequência acumulada são as manchas e as pintas.

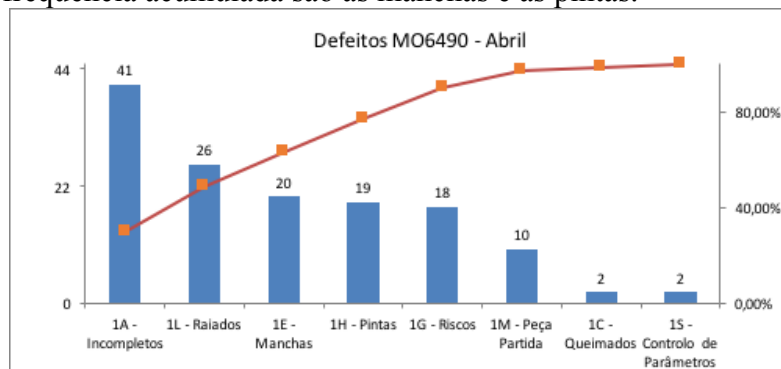


Figura 45 - Gráfico de Pareto do molde MO6490 do mês de Abril

No mês de maio, os incompletos voltam a perder expressão. O número de peças com pintas, riscos e manchas somados totalizam 77,3 por cento dos defeitos, próximo do alvo definido. Produziram-se 82 peças com pintas, 47 com riscos e 38 com manchas, Figura 46.

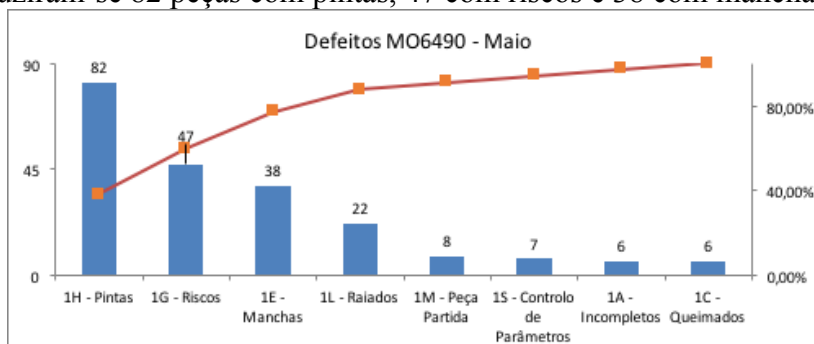


Figura 46 - Gráfico de Pareto do molde MO6490 do mês de Maio

Ficou evidente que os defeitos mais recorrentes ao longo do período de análise foram as manchas e as pintas, seguidos dos riscos, raiados e incompletos. Identificados os defeitos mais frequentes, procurou-se determinar os fatores que lhes deram origem, para que posteriormente pudessem ser tomadas medidas que os eliminassem.

A análise às produções do molde teve início no final de maio pelo que, o mais urgente será procurar dar resposta ao desperdício nesse mês: pintas, manchas e riscos. Estabeleceram-se todas as possíveis relações de causalidade para estes tipos de defeito baseado na bibliografia recolhida, descartando as causas que parecem ser menos adequadas ao caso de estudo até apurar aquelas que serão as mais prováveis.

Embora os incompletos e raiados tenham aparecido em menor número neste último mês, fez-se o mesmo estudo por forma a perceber o que terá provocado essas anomalias para que no futuro a sua identificação e correção seja mais célere.

Manchas e Pintas

Como as causas que provocam manchas e pintas estão fortemente interligadas e associadas à contaminação e degradação do material, resolveu-se fazer a sua análise conjunta. Na figura 47 apresenta-se o diagrama causa-efeito para este tipo de defeito, seguido de uma breve explicação e análise de cada possível origem.

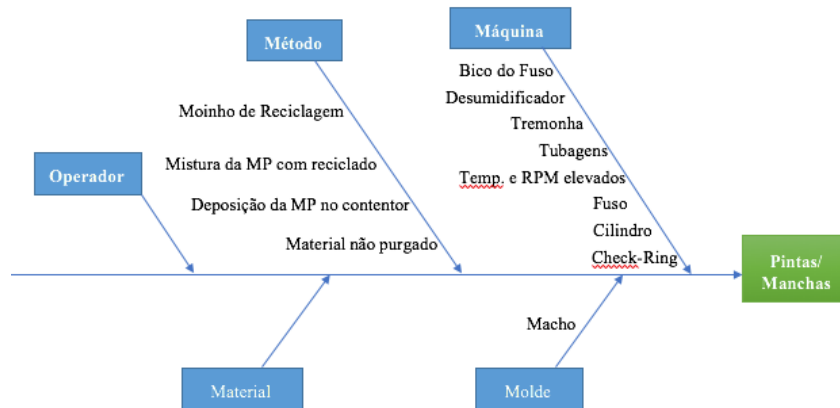


Figura 47 - Diagrama Ishikawa para os defeitos pintas e manchas

Moinho de reciclagem: com a entrada de material vindo do exterior ao moinho é inevitável que haja contaminação do equipamento, e consequentemente do material já reciclado.

Mistura da matéria-prima com material reciclado: na operação de misturar o material reciclado com o material virgem poderá haver contaminação do contentor caso esta ação não seja efetuada num ambiente limpo, ou o próprio material reciclado trazer impurezas consigo.

O material utilizado nas produções do molde MO6490 é totalmente virgem, pelo que estas duas hipóteses podem ser descartadas à partida.

Deposição da matéria-prima no contentor de transporte: poderá haver entrada de elementos exteriores no momento em que o material é despejado no contentor.

Tendo-se assistido ao modo como esta operação é efetuada, existe um risco real de lixo, poeiras ou até mesmo granulado escuro pertencente a outro material poder ser inserido no contentor de transporte. O saco da matéria-prima acumula eletricidade estática pelo que, com alguma facilidade os granulados ficam presos, podendo vir a ser inseridos acidentalmente no contentor.

Desumidificador, Tremonha, Tubagens: o material até ser injetado terá que passar pelo desumidificador, tremonha e respetivos tubos de ligação. Permanecendo por vezes durante várias horas nesses componentes. Com o tempo existe a possibilidade de se acumular sujidade.

Esta possibilidade deverá ser tida em conta, não havendo evidências que levem a ser desconsiderada.

Temperatura e velocidade de rotação do fuso elevada: o material ao ser processado a temperaturas demasiado elevadas, ou mesmo estando dentro dos limites de processamento permitidos pelo material, mas sendo exposto durante um longo período de tempo, este degradar-se-á. O mesmo sucede caso a velocidade de rotação do fuso seja demasiado elevada (calor de fricção). O material carbonizado ao ser posteriormente injetado irá provocar pontos pretos na superfície da peça.

O operador insere os parâmetros de injeção na máquina com base na ficha de parâmetros, havendo apenas alguma margem de afinação dentro das tolerâncias estipuladas. Não sendo uma causa provável, dado a existência da ficha de parâmetros e procedimentos a cumprir, esta causa não poderá ser descartada uma vez que basta que o material resida na tremonha durante um período demasiado longo para que este se deteriore.

Fuso, Cilindro, Válvula de não-retorno: a superfície do fuso e do cilindro são cromadas, no entanto com o desgaste pode gerar-se alguma rugosidade onde se irá acumular material degradado. Este irá contaminar a peça final em posteriores injeções. O mesmo pode suceder caso a válvula de não-retorno se encontre danificada.

Bico do fuso: caso o bico do fuso contenha algum tipo de sujidade, esta poderá ser arrastada para a cavidade no enchimento.

Seria expetável que os defeitos provocados pela contaminação vinda do desgaste destes elementos se manifestassem de uma forma mais acentuada no início da produção até que o sistema fosse totalmente purgado, o que não é o caso, visto que os pontos pretos também aparecem a meio da produção. No entanto, estas possibilidades não podem ser totalmente descartadas.

Material não purgado: após cada produção, a máquina deve ser purgada antes de dar início à produção seguinte com um novo molde. A mistura de diferentes materiais poderá ser incompatível caso tenham diferentes cores ou temperaturas de processamento, originando peças com manchas.

Uma vez que nesta máquina apenas trabalham dois moldes e com a mesma matéria-prima, esta hipótese não se coloca.

Macho: existência de gorduras no molde, sujidade, ou a excessiva utilização de desmoldante para facilitar a extração contamina o aspeto final da peça.

Não é comum a utilização de desmoldante neste molde, pelo que esta origem de contaminação é pouco provável de existir.

As causas identificadas como sendo as mais prováveis para o aparecimento de pintas e manchas nas peças são então: contaminação do contentor de transporte aquando da sua alimentação, sujidade acumulada no desumidificador, tremonha e tubos de ligação, tempos prolongados da matéria-prima na tremonha, e possível desgaste existente no fuso, no cilindro ou na válvula de não-retorno.

Riscos

As possíveis causas identificadas e analisadas que provocam o aparecimento de peças riscadas são apresentadas no diagrama causa-efeito da figura 48.

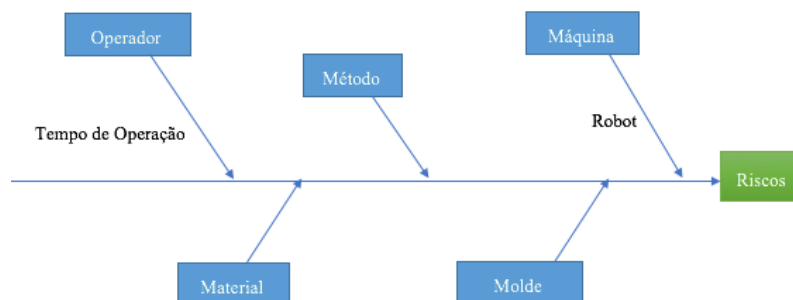


Figura 48 - Diagrama Ishikawa para o defeito riscos

Robot: as garras do robot prendem e transportam através de um sistema de vácuo as peças desde o molde até ao tapete. Caso este não esteja corretamente calibrado e a funcionar na sua plenitude as peças poderão ser deixadas cair antes do seu destino final.

Foi possível verificar que as peças nem sempre chegavam ao tapete, caindo a meio do seu percurso.

Tempo de operação: caso o operador não cumpra as operações dentro do tempo de ciclo estipulado, as peças deixadas pelo robot irão acumular-se sendo que a última peça a ser pousada poderá provocar riscos na anterior.

Verificou-se que a força com que o robot larga a peça no tapete é suficiente causar dano na peça que se encontra por baixo desta.

As causas identificadas como podendo estar na origem do aparecimento de riscos nas peças foram: insuficiência do robot e/ou do operador.

Raiados

Analisa-se agora as possíveis fontes que originam a produção de peças com raiados. Apresenta-se na figura 49 o diagrama causa-efeito correspondente para este tipo de defeito.

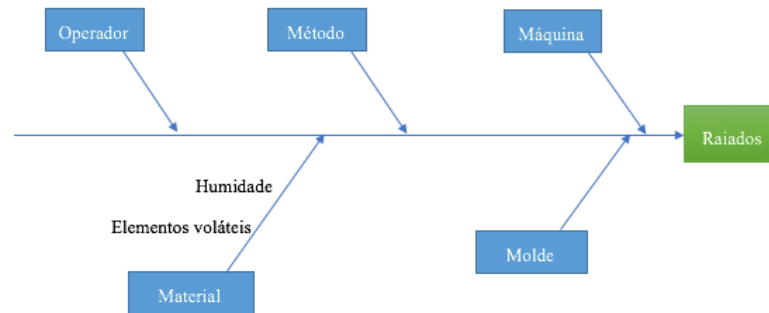


Figura 49 - Diagrama Ishikawa para o defeito raiados

Humidade na matéria-prima: caso o material não seja devidamente condicionado durante o seu armazenamento os granulados podem absorver humidade. Ao ser injetado, as bolhas de vapor presentes serão forçadas a escoar na frente de fluxo, que ao tentar “escapar” migram para as paredes do molde, condensando à sua superfície.

Basta que o material não seja convenientemente armazenado ou que o tempo que deva permanecer no desumidificador não seja cumprido para que haja uma certa humidade no material que irá evaporizar durante a injeção. Embora não tenha sido testemunhado qualquer prática contrária aos procedimentos, esta hipótese não poderá ser descartada.

Elementos voláteis: durante a plasticização há elementos voláteis que se libertam do plástico fundido. Caso não sejam removidos corretamente durante o processo, estes irão formar bolsas que serão empurrados para a frente de fluxo e levados para a cavidade onde aparecerão posteriormente na peça moldada.

Este problema resolve-se por via do aumento de um parâmetro de injeção, a contrapressão. Uma vez que os raiados apareceram com alguma importância apenas nos meses de abril e de maio, é pouco credível que a origem deste defeito esteja na má escolha de parâmetros.

As causas identificadas como sendo as mais prováveis para o aparecimento de raiados nas peças são: humidade na matéria-prima e/ou existência de elementos voláteis no processo.

Incompletos

Analisa-se agora as possíveis causas que originam as peças incompletas. Na figura 50 apresenta-se o diagrama causa-efeito para este tipo de defeito.

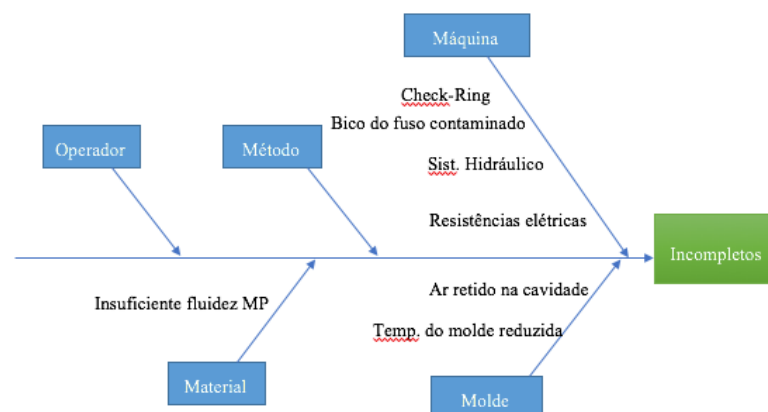


Figura 50 - Diagrama Ishikawa para o defeito incompletos

Ar retido na cavidade: Os canais de escape do molde devem permitir a evacuação do ar à medida que a cavidade é preenchida. A resistência do ar ao ser comprimido pode provocar o preenchimento incompleto da peça.

É uma possibilidade que não pode ser descartada, devendo ser alvo de uma análise mais cuidada.

Resistências elétricas: variações no sistema de aquecimento impedem que o material tenha a fluidez necessária a cada injeção para o total preenchimento da cavidade, também conhecido por "cold shot".

As resistências do cilindro assim como do carburador podem não estar a funcionar em total conformidade.

Temperatura do molde insuficiente: o material ao entrar no molde "frio", arrefece antes do total enchimento da cavidade.

O molde foi concebido para trabalhar à temperatura da água da rede, por volta dos 14°C, pelo que esta hipótese não se coloca.

Insuficiente fluidez do material: caso a matéria-prima adquirida apresente uma composição desadequada comparativamente à requerida, ou tenha um Índice de Fluidez inferior ao especificado, o fluido não conseguirá preencher o molde na sua totalidade para iguais condições de processamento.

O material à entrada da fábrica não é sujeito a um controlo de qualidade, confiando a sua composição ao fornecedor, pelo que esta poderá ser uma fonte de variação no processo.

Contaminação no bico do fuso: a sujidade existente no bico do fuso é arrastada para a cavidade no enchimento da cavidade, não permitindo o seu enchimento.

Este tipo de anomalia é mais comum no arranque, não sucedendo com tanta frequência durante a produção.

Insuficiência no sistema hidráulico: vedantes e sistema de bombagem hidráulica sofrem desgaste com o passar do tempo, podendo provocar variação acrescida ao processo.

Válvula de não-retorno danificada: o dano existente na válvula de não-retorno poderá ser impeditivo que a almofada do processo esteja estável, provocando incompletos ou marcas de extração.

Tanto o sistema hidráulico como a válvula de não-retorno têm um papel fundamental na consistência do processo, pelo que o seu estado deve ser constantemente verificado.

Da análise efetuada identificam-se as seguintes causas que podem ser preponderantes na origem de incompletos: ar retido no molde, deficiência no sistema de aquecimento, variação no índice de fluidez do material, insuficiência do sistema hidráulico e da válvula de não-retorno.

Os incompletos surgiram com forte expressão no mês de abril, embora não se tenha acompanhado esse período em proximidade, por conversas informais foi possível obter a informação de que a origem do problema estaria na insuficiência do sistema hidráulico, entretanto corrigida. Pelo que foi possível apurar, a anomalia não foi facilmente identificada, tendo o desperdício sido prolongado no tempo. Foi também possível saber que durante o período de instabilidade tanto se produziam peças incompletas como peças com marcas de extração (não registadas), ou seja, o sistema tanto injetava material a mais como a menos para dentro da cavidade. A maior dispersão dos valores do peso identificada na fase anterior nas cartas de controlo referentes a esta característica no mês de abril aparentemente poderá estar correlacionada com este fato descrito. Até haver uma intervenção no sistema hidráulico da máquina, o ajuste do processo foi feito por alteração dos parâmetros de injeção, no caso, aumentando a contrapressão, para que se conseguisse absorver alguma da instabilidade.

Contrariamente ao que os resultados do ensaio de capacidade efetuados à máquina indicavam, durante o mês de abril esta não esteve capaz. Tal leva a julgar que dado o espaçamento temporal dos ensaios ser longo, não se podem retirar conclusões para além da sua capacidade momentânea. Ou seja, ainda que os parâmetros de capacidade da máquina

estejam dentro dos limites estipulados, a capacidade para produzir continuamente peças com qualidade a longo prazo poderá não estar garantida.

4.2.4 Melhorar

Nesta fase, partindo das fontes de perturbação do processo identificadas e analisadas na etapa anterior para o molde MO6490, expõem-se uma série de propostas que visam a melhoria da qualidade das peças nele produzidas. Algumas das medidas sugeridas são vocacionadas para este caso de estudo, enquanto que outras têm um carácter mais generalizado.

Faz parte da fase *melhorar* a aplicação do método Taguchi proposto no capítulo 3, com o objetivo de otimizar os parâmetros de injeção por forma a que as características-críticas de qualidade peso e cota index sejam centradas no seu respetivo valor nominal, variando o mínimo em torno deste. Por uma questão de organização do documento, a aplicação do método será apresentada no subcapítulo seguinte.

Pintas e Manchas

Para a eliminação dos defeitos pintas e manchas existentes sugerem-se as seguintes medidas:

- Rever os procedimentos e o local de deposição da matéria-prima no contentor de transporte;
- Limpeza dos contentores de transporte com a referência da matéria-prima do molde MO6490;
- Criação de procedimentos de limpeza para os contentores de transporte;
- Limpeza em detalhe do desumidificar, tremonha e dos tubos de ligação;
- Inspeção ao estado do fuso, do cilindro e da válvula de não-retorno, substituindo-os ou corrigindo-os caso seja necessário.

Riscos

Para eliminar o aparecimento de peças com riscos propõem-se as seguintes medidas:

- Inspeção ao estado da garra do robot e do sistema de ar comprimido, calibrando-o caso seja necessário;
- Sensibilizar e formar os operadores para que a operação de recolha da peça do tapete seja executada em tempo útil.

Raiados

Para corrigir o defeito das peças com raiados propõem-se as seguintes medidas:

- Inspeccionar o estado do desumidificador, corrigindo-o caso seja necessário,
- Verificar se as temperaturas e os tempos de pré-processamento da matéria-prima são cumpridos a cada produção.

Incompletos

Para tratar o problema das peças incompletas propõem-se as seguintes ações:

- Estudar o aumento da capacidade de escape, por via de um alargamento da dimensão dos canais de evacuação;
- Limpeza dos canais de escape;
- Avaliar a capacidade do sistema de aquecimento(resistências), procedendo-se à sua substituição caso seja necessário;
- Adquirir espectrómetros e instrumentos de medição do índice de fluidez, fazendo-se o controlo da composição do material adquirido assim como a sua fluidez;

- Avaliar a capabilidade do sistema hidráulico e da válvula não-retorno, procedendo-se à sua substituição caso seja necessário;
- Reduzir o intervalo de tempo entre ensaios de capabilidade das máquinas, de seis para três meses;
- Instalação de sensores de pressão e temperatura nos moldes, permitindo um controle mais robusto do processo e uma identificação mais rápida e precisa da origem da perturbação.

4.2.5 Controlar

Na última fase do projeto dever-se-á acompanhar a execução das propostas de melhoria e monitorizar o processo após essas medidas serem tomadas. Deve-se analisar a evolução do número de peças rejeitadas assim como o tipo de defeitos mais recorrentes por forma a aferir se as ações tomadas provocaram alguma melhoria no processo. Simultaneamente, deve-se verificar a evolução do comportamento das características-críticas de qualidade através das cartas de controlo.

Esta fase não chegou a decorrer uma vez que no término do estágio as propostas de melhoria ainda estavam a ser avaliadas quanto à sua viabilidade.

4.3 Aplicação Método Taguchi

Neste capítulo procede-se à aplicação do método de Taguchi ao molde MO6490 com a estrutura sequencial proposta no subcapítulo 3.3.3. Pretende-se incrementar a consistência com que as peças são produzidas com níveis de qualidade elevados através da diminuição da variação natural do processo. Algo que só é conseguido através de uma modificação no processo, ou seja, com um ajuste nos parâmetros de injeção.

Quando um molde se encontra na fase de produção de série significa que previamente este obteve a aprovação do Departamento de Engenharia. Ou seja, foi-lhe atestada capacidade para produzir peças conformes sem que para isso seja necessário proceder a mais algum tipo de modificação. A partir dessa fase os parâmetros de injeção com que irá produzir ficam definidos.

É inevitável que o molde ao longo do seu tempo de vida sofra desgaste acumulado, ou que o processo sofra perturbações exteriores que tanto poderão ter origem na instabilidade da máquina, do ambiente exterior ou outras. Embora os parâmetros do processo estejam previamente estipulados, o procedimento permite que sejam modificados caso essa alteração não ultrapasse os limites das tolerâncias definidos na ficha de parâmetros. Esta janela de oportunidade oferece a possibilidade ao operador de calibrar o processo quando as condições de funcionamento são adulteradas por força das causas enumeradas, sendo em muitas das ocasiões a sua origem tão mínima e dificilmente identificável. No entanto, o suficiente para provocar alterações no sistema e na qualidade das peças, provocando desperdício.

O objetivo da aplicação do método é permitir a melhoria da qualidade das peças produzidas através do (re)centramento das características-críticas de qualidade do processo em torno do seu valor nominal com a menor variação possível. Embora possam estar dentro dos seus limites especificados, um processo só será robusto caso a sua variação seja minimizada e as suas respostas centradas. Esta é uma condição necessária para que o processo esteja mais protegido dos agentes exteriores, e que a produção de peças com a qualidade desejada seja conseguida de uma forma mais consistente.

Na tabela 3 do subcapítulo 4.2.2 avaliou-se a capabilidade do processo através dos seus índices de capabilidade, tendo-se constatado que o comportamento do processo não foi constante de mês para mês, assim como, a diferença registada entre os valores dos C_p e C_{pk} das respetivas respostas evidencia que estas não estão centradas.

4.3.1 Seleção das características-críticas de qualidade, fatores e níveis - matriz L_{12}

Nesta primeira etapa da sequência experimental selecionaram-se a(s) característica(s) de qualidade que se pretendem melhorar, assim como os seis fatores e interações consideradas que integrarão a matriz L_{12} . Construída a matriz, o efeito que esses fatores provocam nas respostas será analisado.

A escolha das características-críticas de qualidade foi feita previamente no ponto 4.2.1, durante a definição do problema. As características que se pretendem melhorar são então: o peso e a cota índice, tratando-se por isso de uma otimização de múltipla resposta.

A escolha dos fatores a serem analisados teve por base a avaliação que foi feita no subcapítulo 2.7 quanto ao impacto que os parâmetro-chave têm na qualidade da peça. Dos parâmetros avaliados escolheram-se seis: velocidade, pressão e temperatura de injeção, tempo de 2ª pressão, 2ª pressão e compactação. Com a escolha destes fatores pretendeu-se dar uma maior relevância à fase de enchimento, seguida da fase de compactação e um pouco menor à de plasticização. Uma vez que o molde trabalha à temperatura da rede ($\approx 14^\circ\text{C}$) foi dada uma menor importância à fase de arrefecimento uma vez que haveria menos fatores que pudessem ser alterados. No entanto, outros parâmetros poderiam ter sido incluídos, nomeadamente, o tempo de arrefecimento.

Foi incluído no estudo a análise da possibilidade da existência de interação entre dois pares de fatores: temperatura com pressão de injeção e pressão com velocidade de injeção. A escolha por estes conjuntos de parâmetros para avaliar a dependência que têm relativamente ao nível do seu par no efeito que provocam à resposta deveu-se à não linearidade identificada no ponto 2.7.1 entre esses fatores.

Nesta fase, apenas pretende-se fazer o *screening* às variáveis. Ou seja, tem-se como objetivo identificar entre os parâmetros selecionados quais são os que têm um maior impacto nas respostas. Assim sendo, apenas dois níveis por fator serão suficientes. O valor dos níveis escolhidos, *alto* e *baixo*, deve abranger um intervalo alargado por forma a garantir que provoquem uma alteração à resposta.

A escolha dos níveis foi baseada na ficha de parâmetros do molde MO6490, somando e subtraindo ao valor nominal estipulado o valor da sua tolerância.

Na tabela 6 apresentam-se os fatores e os valores dos níveis utilizados na construção da matriz L_{12} .

Tabela 6 – Níveis e fatores utilizados na matriz L_{12}

	Temp.Inj (°C)	Contrapressão (bar)	Pr.inj (bar)	Velocidade Inj. (mm/s)	2ºP (bar)	Tempo 2ºP (s)
Nominal	170	13	95	56	43	4
Tolerância	+/-10	+/-5	+/-10	+/-5	+/-5	+/-1
Inferior	160	8	85	51	38	3
Superior	180	18	105	61	48	5

Dada a geometria da peça, o valor da velocidade de injeção e da contrapressão não são constantes ao longo do tempo, variando ao longo de um perfil, Tabela 7.

Quando o molde for ensaiado na máquina de injeção os seus valores serão alterados em todos os grupos de igual forma.

Tabela 7 – Perfil de contrapressão e de velocidade de injeção

Grupo	1-3	4	5-10
Perfil Contrapressão (bar)	13	8	5

Grupo	1	3	4-9	10
Perfil Velocidades (mm/s)	56	22	55	35

Expõe-se na tabela 8 a sequência experimental seguida para a identificação dos fatores com maior impacto. Embora não fosse absolutamente necessário, cada experiência foi repetida três vezes, considerando o resultado final as médias dos valores obtidos. Esta opção foi tomada com o objetivo de minimizar o efeito da variabilidade no processo, aumentando a

fiabilidade da análise. O aspeto visual das peças nesta fase não é importante, ainda assim, registou-se qualquer defeito identificado. Os resultados da análise de variância foram gerados com recurso ao *software* de estatística Minitab.

Tabela 8 – Matriz L₁₂

Ensaio	Temp.Inj (°C)	Contrapressão (bar)	Pr.inj (bar)	Velocidade Inj. (mm/s)	2ºP (bar)	Tempo 2ºP (s)
1	160	8	85	51	38	3
2	160	8	85	51	48	5
3	160	8	105	61	38	3
4	160	13	105	61	48	5
5	160	13	85	61	38	5
6	160	13	105	51	48	3
7	180	8	105	51	48	5
8	180	8	85	61	48	3
9	180	8	105	61	38	5
10	180	13	85	51	38	5
11	180	13	105	51	38	3
12	180	13	85	61	48	3

4.3.2 ANOVA – Cota Índex

Nesta fase analisam-se os resultados obtidos dos ensaios da matriz L₁₂, quantificando o efeito que cada fator provoca na característica-crítica de qualidade cota index. Não se espera que haja uma diferença significativa no impacto causado entre as peças produzidas em cada uma das cavidades. No entanto, e para não se incorrer em erros de análise, realizou-se a análise de variância separadamente para cada uma das cavidades.

Na tabela 9 apresentam-se os resultados das medições da cota index para os ensaios realizados com a matriz L₁₂.

Tabela 9 – Resultados da cota index matriz L₁₂

Resultados Matriz L12						
Ensaio	Repetição	Cota Index (mm)			Defeito Visual	
		Cavidade I		Cavidade II		
1	I	319,56	319,57	319,50	319,47	OK
	II	319,64		319,46		Ok
	III	319,5		319,45		Incompleto
2	I	319,83	319,86	319,54	319,66	OK
	II	319,91		319,66		OK
	III	319,85		319,77		OK
3	I	319,77	319,74	319,54	319,51	OK
	II	319,74		319,50		OK
	III	319,72		319,48		OK
4	I	320,02	319,98	319,70	319,71	OK
	II	319,97		319,75		Rebarba
	III	319,94		319,68		Rebarba
5	I	319,75	319,75	319,22	319,43	OK
	II	319,8		319,57		OK
	III	319,69		319,51		OK
6	I	319,75	319,75	319,55	319,54	Rebarba
	II	319,75		319,58		Rebarba
	III	319,75		319,50		Rebarba
7	I	319,95	320,04	319,66	319,66	Rebarba
	II	320,00		319,73		Rebarba
	III	320,16		319,60		Rebarba
8	I	319,85	319,94	319,70	319,68	Rebarba
	II	320,02		319,67		Rebarba
	III	319,95		319,66		Rebarba
9	I	319,81	319,78	319,66	319,62	OK
	II	319,76		319,59		OK
	III	319,78		319,60		OK
10	I	319,77	319,92	319,61	319,61	OK
	II	320,14		319,64		OK
	III	319,85		319,58		OK
11	I	319,78	319,65	319,61	319,72	OK
	II	319,31		319,64		OK
	III	319,86		319,92		OK
12	I	319,93	319,89	319,65	319,56	Rebarba
	II	319,86		319,58		Rebarba
	III	319,88		319,46		Rebarba

Cavidade 1

Com base nas medições da cota índice para a cavidade 1 da tabela 9 realizou-se a análise de variância, apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da ANOVA para a cota índice da cavidade 1

Análise de Variância - Cota Index Cav I						
Fator	GL	SQ (A.J.)	QM (A.J.)	Valor F	Valor P	Contribuição(%)
Temp Inj	1	0,033046	0,033046	9,52	0,054	16,19%
Contrapressão	1	0,000934	0,000934	0,27	0,64	45,76%
Pr Inj	1	0,003578	0,003578	1,03	0,385	1,75%
Vel Inj	1	0,00717	0,00717	2,07	0,246	3,51%
2ªP	1	0,109928	0,109928	31,68	0,011	53,86%
Tempo 2ªP	1	0,010114	0,010114	2,91	0,186	4,96%
Temp.Inj*Vel.Inj	1	0,023254	0,023254	6,7	0,081	11,39%
Pr.Inj*Vel.Inj	1	0,005654	0,005654	1,63	0,292	2,77%
Erro	3	0,01041	0,00347			5,10%

Constata-se que os parâmetros com maior influência para a análise em questão são: 2ª pressão(53,86 %), temperatura de injeção(16,19%), interação da temperatura de injeção com a velocidade de injeção(11,39%) e tempo de 2ª pressão. Com um erro de 5,10 %, quantificando os parâmetros e as interações que não foram tidas em conta, Figura 51.

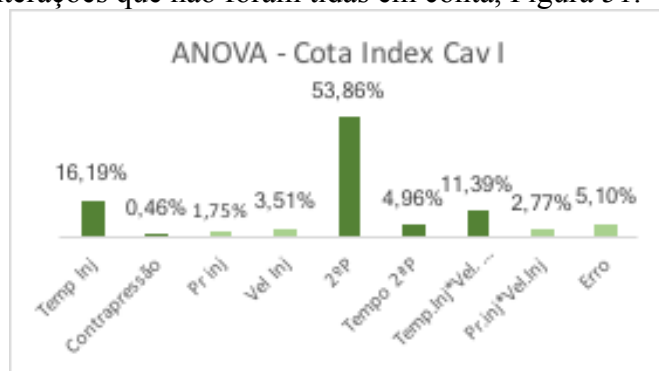


Figura 51 - Impacto dos parâmetros na cota índice da cavidade 1

Cavidade 2

Realizou-se a análise de variância à resposta cota índice para a cavidade 2 atendendo às medições apresentadas na tabela 9. Dos resultados, identificam-se os parâmetros que têm maior efeito na resposta nessa cavidade. Caso haja alguma disparidade entre os fatores mais importantes entre as cavidades, terá que se fazer uma análise crítica, escolhendo de entre os parâmetros estudados os quatro que serão considerados como os que têm um maior impacto na característica-crítica de qualidade cota índice, Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados da ANOVA à cota índice da cavidade 2

Análise de Variância - Cota Index Cav II						
Fator	GL	SQ (A.J.)	QM (A.J.)	Valor F	Valor-P	Contribuição(%)
Temp Inj	1	0,361	0,361	0,13	0,742	0,09%
Contrapressão	1	1,653	1,653	0,6	0,496	0,41%
Pr Inj	1	0,837	0,837	0,3	0,621	0,21%
Vel Inj	1	6,83	6,83	2,47	0,214	1,69%
2ªP	1	357,128	357,128	128,91	0,001	88,46%
Tempo 2ªP	1	5,982	5,982	2,16	0,238	1,48%
Temp.Inj*Vel.Inj	1	12,827	12,827	4,63	0,121	3,18%
Pr.Inj*Vel.Inj	1	9,79	9,79	3,53	0,157	2,42%
Erro	3	8,311	2,77			2,06%

Os parâmetros com maior impacto na peça produzida da cavidade 2, Figura 52, para a resposta cota índice são: temperatura de injeção (29,56%), 2ª pressão (23,96%), interação da pressão de injeção com a velocidade de injeção (8,36%) e pressão de injeção (4,64%). Tendo

a percentagem de erro aumentado consideravelmente de 5,10% para 28,80% face à cavidade 1.

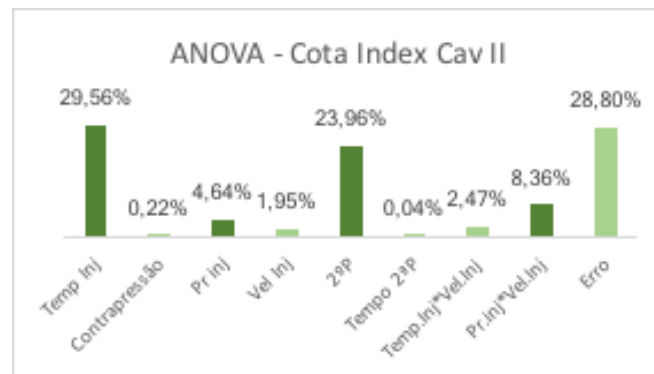


Figura 52 - Impacto dos parâmetros na cota index da cavidade 2

Comparando os fatores mais influentes em cada cavidade, registou-se alguma alteração. Enquanto o tempo de 2ª pressão e a interação temperatura de injeção X velocidade de injeção eram relevantes para a cavidade 1, deixaram de o ser para a cavidade 2 por troca da pressão de injeção e da interação pressão de injeção X velocidade de injeção.

Os quatro fatores selecionados para posterior análise de otimização como sendo os mais importantes para a resposta cota index das duas cavidades são: temperatura de injeção, 2ª pressão, velocidade de injeção e pressão de injeção. Incluiu-se estes dois últimos fatores devido ao facto do seu efeito ganhar importância quando combinados.

4.3.3 ANOVA – Peso

Nesta fase a análise incidirá sobre os parâmetros que mais impactam a característica crítica de qualidade peso para as peças produzidas pelo molde MO6490. O estudo seguirá uma lógica similar à que foi realizada na análise à variância para a cota index, separando o efeito dos fatores para cada uma das cavidades.

Na tabela 12 apresentam-se os resultados alcançados para as peças pesadas dos ensaios da matriz L₁₂.

Tabela 12 - Resultados do peso matriz L₁₂

Resultados Matriz L12						
Ensaio	Repetição	Peso (g)				Defeito Visual
		Cavidade I		Cavidade II		
1	I	394,16	393,20	395,93	395,32	OK
	II	393,64		395,28		Ok
	III	391,81		394,74		Incompleto
2	I	405,11	406,86	403,85	404,77	OK
	II	409,32		406,17		OK
	III	406,15		404,30		OK
3	I	395,32	394,61	396,39	395,89	OK
	II	394,50		395,72		OK
	III	394,00		395,56		OK
4	I	407,50	410,90	404,91	406,92	OK
	II	414,11		408,67		Rebarba
	III	411,08		407,17		Rebarba
5	I	394,38	394,61	396,16	395,97	OK
	II	395,32		396,26		OK
	III	394,14		395,49		OK
6	I	397,46	400,10	399,08	399,98	Rebarba
	II	403,62		401,63		Rebarba
	III	399,23		399,23		Rebarba
7	I	404,26	407,43	403,53	405,11	Rebarba
	II	411,72		407,57		Rebarba
	III	406,30		404,24		Rebarba
8	I	401,88	404,16	401,23	401,96	Rebarba
	II	407,85		403,78		Rebarba
	III	402,74		400,88		Rebarba
9	I	394,90	394,91	396,44	396,17	OK
	II	395,21		396,27		OK
	III	394,63		395,80		OK
10	I	395,45	394,74	396,62	396,03	OK
	II	394,54		395,78		OK
	III	394,22		395,70		OK
11	I	393,07	392,10	394,49	394,07	OK
	II	391,85		394,05		OK
	III	391,37		393,67		OK
12	I	402,21	404,29	401,11	401,90	Rebarba
	II	407,96		403,64		Rebarba
	III	402,71		400,94		Rebarba

Cavidade 1

Com base nas medições para o peso da cavidade 1 expostas na tabela 12 realizou-se a análise de variância com o objetivo de identificar os parâmetros que mais impactam essa resposta. Na tabela 13 apresentam-se os resultados.

Tabela 13 - Resultados da ANOVA para o peso da cavidade 1

Análise de Variância - Peso Cav 1						
Fator	GL	SQ (A _j)	QM (A _j)	Valor F	Valor-P	Contribuição(%)
Temp Inj	1	0,361	0,361	0,13	0,742	0,09%
Contrapressão	1	1,653	1,653	0,6	0,496	0,41%
Pr Inj	1	0,837	0,837	0,3	0,621	0,21%
Vel Inj	1	6,83	6,83	2,47	0,214	1,69%
2ºP	1	357,128	357,128	128,91	0,001	88,46%
Tempo 2ºP	1	5,982	5,982	2,16	0,238	1,48%
Temp.Inj*Vel.Inj	1	12,827	12,827	4,63	0,121	3,18%
Pr.Inj*Vel.Inj	1	9,79	9,79	3,53	0,157	2,42%
Erro	3	8,311	2,77			2,06%

Os parâmetros que têm mais influência no peso das peças produzidas pela cavidade 1 são: 2ª pressão (88,46%), interação temperatura de injeção com velocidade de injeção (3,18%), interação pressão de injeção com velocidade de injeção(2,42%) e velocidade de injeção(1,69 %), Figura 53.

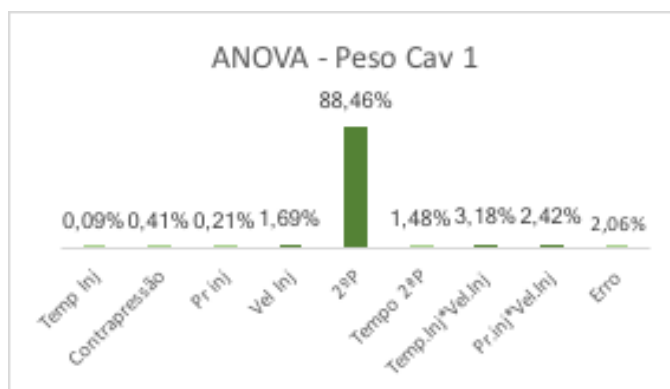


Figura 53 - Impacto dos parâmetros no peso da cavidade 1

Cavidade 2

Utilizando os resultados alcançados da tabela 11 para o peso das peças produzidas pela cavidade 2, realizou-se a análise de variância. Da mesma forma que sucedeu anteriormente na análise à cota índice, os quatro fatores mais influentes para a característica-crítica de qualidade peso poderão advir de uma avaliação ponderada caso haja diferenças entre os resultados obtidos para cada cavidade, Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados da ANOVA para o peso da cavidade 2

Análise de Variância - Peso Cav 2						
Fator	GL	SQ (A.)	QM (A.)	Valor F	Valor-P	Contribuição(%)
Temp.Inj	1	0,019	0,019	0,02	0,908	0,01%
Contrapressão	1	1,527	1,527	1,24	0,346	0,84%
Pr.Inj	1	0,148	0,148	0,12	0,751	0,08%
Velocidade Inj	1	1,033	1,033	0,84	0,427	0,57%
2ªP	1	161,48	161,48	131,56	0,001	88,91%
Tempo 2ªP	1	4,641	4,641	3,78	0,147	2,56%
Temp.Inj*Velocidade Inj	1	5,332	5,332	4,34	0,128	2,94%
Pr.Inj*Velocidade Inj	1	3,767	3,767	3,07	0,178	2,07%
Erro	3	3,682	1,227			2,03%

Os fatores que mais impactam o peso das peças produzidas pela cavidade 2, Figura 54, são: 2ª pressão (88,91%), interação da temperatura de injeção com a velocidade de injeção (2,94%), tempo de 2ª pressão (2,56%) e interação da pressão de injeção com a velocidade de injeção (2,07%).

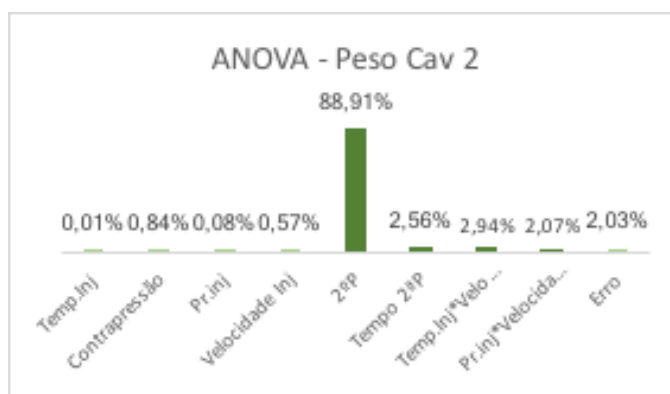


Figura 54 - Impacto dos parâmetros no peso da cavidade 2

O parâmetro 2ª pressão é claramente o mais influente na resposta peso para as duas cavidades. Comparando o que sucedeu com os outros parâmetros, registou-se apenas uma diferença entre as cavidades. Se na cavidade 1 a velocidade de injeção foi dos fatores mais importantes, tal não se verificou na cavidade 2, por substituição do parâmetro tempo de 2ª pressão. De referir que a relevância dos restantes parâmetros em relação à 2ª pressão se verificou residual.

Os quatro parâmetros selecionados como sendo aqueles que têm uma maior importância relativamente à resposta peso são: 2ª pressão, temperatura de injeção, velocidade de injeção e pressão de injeção. A escolha por estes fatores deveu-se ao facto das duas interações serem importantes para as duas cavidades, o que incluiu os três fatores aí correlacionados, juntando-os à 2ª pressão.

4.3.4 Seleção de fatores e níveis – matriz L_9

Nesta fase, irá proceder-se à seleção dos fatores e do valor dos níveis que constituem a matriz L_9 . A escolha pela dimensão desta matriz resultou do facto de ela permitir acomodar uma quantidade razoável de fatores (quatro) a três níveis cada, o que aumenta a possibilidade de se encontrar os valores que melhor satisfaçam a condição desejada, diminuindo o risco de haver não-linearidade entre níveis caso se pretenda utilizar modelos preditivos de resposta.

A escolha pelos fatores a utilizar na otimização deve obedecer a um equilíbrio entre aqueles que mais influenciam uma e outra resposta. Neste caso, não foi necessário procurar uma solução de compromisso uma vez que os quatro fatores que mais influenciam tanto a cota índice como o peso são: 2ª pressão, temperatura de injeção, velocidade de injeção e pressão de injeção.

Esta é uma fase de otimização, pelo que a tolerância dos valores dos parâmetros face ao definido poderá e deverá ser encurtada relativamente à que foi utilizada na matriz L_{12} , uma vez que é espectável que a solução ótima esteja algo próxima dos valores nominais inicialmente estabelecidos. Expõem-se na tabela 15 os fatores e níveis utilizados na matriz L_9 .

Tabela 15 - Níveis e fatores utilizados na matriz L_9

	Temp.Inj (°C)	Pr.inj (bar)	2ºP (bar)	Velocidade Inj. (mm/s)
Nominal	170	95	43	56
Tolerância	+/-3	+/-3	+/-3	+/-3
Inferior	167	92	40	53
Superior	173	98	46	59

Como foi referido anteriormente, o objetivo da aplicação deste método é encontrar a combinação paramétrica que leve a que os valores do peso e da cota índice se aproximem o mais possível do seu valor nominal especificado, variando o mínimo em seu redor. No entanto, tal como já se tinha verificado pela análise à evolução da cota índice utilizando as cartas de controlos, o valor da cota situou-se sempre abaixo do valor nominal. Atendendo a que quando se utilizou a matriz L_{12} as condições de funcionamento foram extremadas, utilizando os valores de tolerância limite para os níveis de cada fator, e não se conseguiu que a cota índice ultrapassasse os 320,00 mm especificados, assume-se que o seu valor nominal não é atingível sem que isso provoque um defeito (rebarba).

A explicação encontrada para justificar este facto está no modo como a cota índice é definida. Trata-se de uma dimensão intermédia cravada no macho do molde. Ao valor da dimensão que se pretende que fique gravada na peça, é somada a contração do material. Caso haja falta de rigor na sua estimativa, a peça não terá essa distância exatamente definida como inicialmente pretendido.

Atendendo ao explicitado, haverá uma redefinição de objetivos quanto ao valor nominal pretendido para a cota índice. Em vez do valor especificado na tabela 2, pretende-se que as medições se aproximem dos valores médios das amostras durante o melhor período registado da resposta peso, o mês de março (Tabela 16).

Tabela 16 - Novos valores nominais da cota índice

Cavidade	I	II
Cota Index (mm)	319,52	319,37

Dada a natureza da dimensão em estudo, avaliou-se a possibilidade de existir correlação entre as duas grandezas, cota índice e peso. Utilizando os resultados das tabelas 9 e 12 calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson, tendo-se obtido um valor de 0,788 e de

0,482 para a cavidade 1 e 2. Significa isto que existe uma correlação forte e moderada entre o peso e a cota index medidas, nas respetivas cavidades.

Os valores obtidos são suficientes para considerar com alguma certeza a correlação entre estas grandezas, sustentando assim os novos valores nominais da cota index escolhidos.

Na tabela 17 expõe-se a matriz L_9 com a ordem das experiências utilizada. De ressaltar que cada uma delas foi repetida três vezes, para que seja possível calcular os valores dos quocientes S/N.

Tabela 17 - Matriz L_9

Ensaio	Temp.Inj	Pr.Inj	2ºP	Vel. Inj.
1	167	92	40	53
2	167	95	43	56
3	167	98	46	59
4	170	92	43	53
5	170	95	46	56
6	170	98	40	59
7	173	92	46	53
8	173	95	40	56
9	173	98	43	59

4.3.5 Otimização – Cota Index

Analisa-se agora os resultados das experiências da matriz L_9 com o objetivo de otimizar a resposta cota index das duas cavidades. Utilizou-se a característica de qualidade *Nominal Melhor* para o cálculo dos quocientes sinal-ruído, com o valor nominal de 319,52mm e 319,37mm para a cavidade 1 e 2 respetivamente. À medida que se registaram as medições, avaliou-se o aspeto visual das peças. Apresenta-se na tabela 18 os valores da cota index medidos.

Tabela 18 - Resultados da cota index matriz L_9

Resultados Matriz L_9						
Ensaio	Repetição	Cota Index				Defeito Visual
		Cavidade I	Média	Cavidade II	Média	
1	I	319,49	319,43	319,29	319,11	OK
	II	319,39		318,90		OK
	III	319,40		319,13		OK
2	I	319,56	319,57	319,35	319,28	OK
	II	319,54		319,21		OK
	III	319,61		319,28		OK
3	I	319,79	319,79	319,51	319,56	OK
	II	319,85		319,60		OK
	III	319,72		319,56		OK
4	I	319,77	319,74	319,56	319,56	OK
	II	319,71		319,57		OK
	III	319,75		319,55		OK
5	I	319,67	319,62	319,33	319,40	OK
	II	319,64		319,48		OK
	III	319,55		319,38		OK
6	I	319,64	319,62	319,28	319,34	OK
	II	319,66		319,37		OK
	III	319,56		319,36		OK
7	I	319,64	319,63	319,42	319,40	Rebarba
	II	319,65		319,44		Rebarba
	III	319,60		319,33		Rebarba
8	I	319,65	319,63	319,54	319,46	OK
	II	319,65		319,39		OK
	III	319,59		319,45		OK
9	I	319,60	319,56	319,34	319,33	OK
	II	319,61		319,36		OK
	III	319,48		319,30		OK

Segundo o método Taguchi, a combinação de parâmetros que otimiza a resposta é estimada através das tabelas dos efeitos principais, sendo que o nível de cada fator é escolhido atendendo ao que maximiza o quociente S/N.

Como o molde MO6490 tem duas cavidades, geraram-se as tabelas dos efeitos principais (Tabelas 19 e 20) separadamente, procurando posteriormente encontrar uma solução de compromisso.

Tabela 19 - Tabela dos efeitos principais para a cota index da cavidade 1

Nível	Temp.Inj	Pr.Inj	2ºP	Vel. Inj.
1	21,94	21,94	21,94	21,94
2	14,89	21,94	21,94	21,94
3	21,94	14,89	14,89	14,89

Tabela 20 - Tabela dos efeitos principais para a cota index da cavidade 2

Nível	Temp.Inj	Pr.Inj	2ºP	Vel. Inj.
1	23,10	30,46	23,10	30,46
2	30,46	30,46	30,46	30,46
3	30,46	30,46	17,72	30,46

Atendendo aos níveis que maximizam o quociente S/N para a resposta cota index para cada uma das cavidades, existem quatro combinações que satisfazem as duas cavidades em simultâneo: $A_3B_2C_2D_1$, $A_3B_2C_2D_2$, $A_3B_1C_2D_2$ e $A_3B_1C_2D_1$. Dos quatro conjuntos, nenhum foi anteriormente testado pela matriz L_9 , tendo-se escolhido um deles para ensaio de confirmação, a combinação $A_3B_1C_2D_1$, denominada de agora em diante de solução A.

Realizou-se um ensaio de confirmação com três repetições para os valores dos níveis da solução A, temperatura de injeção (173°C), pressão de injeção (92 bar), 2ª pressão (43 bar) e velocidade de injeção (53 m/s), tendo-se registado para além das cotas index que se pretende agora otimizar, os seus pesos (Tabela 21).

Tabela 21 - Resultados solução A

Solução A	Cota Index (mm)				
		Cavidade I	Média	Cavidade II	Média
	I	319,54	319,55	319,32	319,35
	II	319,60		319,37	
	III	319,55		319,35	
	Peso (g)				
		Cavidade I	Média	Cavidade II	Média
	I	395,71	396,10	396,62	395,83
	II	396,22		395,83	
	III	396,10		395,72	

Analisando-se os resultados, verificou-se que embora só se tenha obtido um valor igual nominal da cota index (cavidade 2 na repetição II), as médias são próximas ao pretendido, 319,55 e 319,35, na respetiva cavidade.

Quanto os valores dos pesos, estiveram sempre abaixo dos 397,00g especificados.

4.3.6 Otimização – Peso

Com o objetivo de otimizar os níveis dos parâmetros de injeção para a resposta peso, analisam-se os resultados obtidos da matriz L_9 . O valor da característica de qualidade *Nominal Melhor* utilizado é o seu valor especificado em projeto, 397,00g. Na tabela 22 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 22 - Resultados do peso matriz L₉

Resultados Matriz L ₉						
Ensaio	Repetição	Peso				Defeito Visual
		Cavidade I	Média	Cavidade II	Média	
1	I	393,54	391,89	394,85	393,43	OK
	II	391,10		392,80		OK
	III	391,04		392,64		OK
2	I	395,92	395,79	396,39	396,34	OK
	II	395,74		396,25		OK
	III	395,72		396,38		OK
3	I	398,76	402,78	399,48	401,98	OK
	II	408,67		405,48		OK
	III	400,90		400,97		OK
4	I	403,27	401,24	401,94	400,67	OK
	II	400,91		400,52		OK
	III	399,55		399,54		OK
5	I	395,67	396,44	396,98	397,13	OK
	II	397,65		397,85		OK
	III	396,01		396,57		OK
6	I	394,48	394,41	395,56	395,50	OK
	II	394,36		395,41		OK
	III	394,39		395,53		OK
7	I	401,13	402,39	400,91	401,19	Rebarba
	II	403,65		402,05		Rebarba
	III	401,23		400,60		Rebarba
8	I	397,27	397,37	398,71	398,39	OK
	II	397,85		398,49		OK
	III	396,99		397,96		OK
9	I	393,24	393,19	394,46	394,43	OK
	II	393,19		394,47		OK
	III	393,13		394,37		OK

Seguindo a mesma lógica do que foi realizado para a otimização da cota índice, gerou-se para cada cavidade as tabelas dos efeitos principais (Tabelas 23 e 24). A melhor combinação paramétrica será aquela que maximiza o quociente S/N das respostas das cavidades em simultâneo.

Tabela 23 - Tabela dos efeitos principais para o peso da cavidade 1

Nível	Temp.Inj	Pr.Inj	2ºP	Vel. Inj.
1	13,98	-3,52	-7,60	-3,52
2	7,96	6,02	10,46	6,02
3	4,44	13,98	-10,88	13,98

Tabela 24 - Tabela dos efeitos principais para o peso da cavidade 2

Nível	Temp.Inj	Pr.Inj	2ºP	Vel. Inj.
1	13,98	-2,92	-1,58	-2,92
2	1,94	10,46	20,00	10,46
3	0,00	10,46	-9,83	10,46

Existe uma única solução que satisfaz as duas cavidades, a combinação A₁B₃C₂D₃, passando a denominar-se por solução B.

Realizou-se um ensaio de confirmação com três repetições para os valores dos níveis da solução B, temperatura de injeção (167°C), pressão de injeção (98 bar), 2ª pressão (43 bar) e velocidade de injeção (59 m/s), tendo-se registado para além dos pesos que se pretende otimizar nesta fase, as suas cotas índice (Tabela 25).

Tabela 25 - Resultados solução B

Solução B	Peso (g)				
		Cavidade I	Média	Cavidade II	Média
	I	397,39	397,39	397,12	397,12
	II	397,56		397,21	
	III	397,28		396,30	
	Cota Index (mm)				
		Cavidade I	Média	Cavidade II	Média
	I	319,54	319,54	319,35	319,35
	II	319,57		319,38	
	III	319,53		319,33	

Embora não se tenha obtido nenhum valor dos pesos das peças igual ao nominal como seria desejado, os valores médios das medições foram de 397,39g e 397,12g, para a cavidade próximos aos 397,00g especificado.

Quanto aos valores das cotas index correspondentes, verificou-se que os seus valores médios não se distanciaram significativamente do pretendido (319,52mm e 319,37mm).

4.3.7 Otimização – Cota Index & Peso

Nesta fase final da estrutura sequencial irá proceder-se à otimização simultânea das duas características de qualidade, peso e cota index. Após se ter encontrado a combinação paramétrica que otimize individualmente uma e outra resposta, a conjugação de parâmetros de injeção que provoca uma melhoria na qualidade global da produção é aquela que melhor satisfaz simultaneamente as duas respostas nas duas cavidades.

Uma vez que existe uma correlação entre as duas grandezas, no mínimo moderada, é expectável que a solução que otimize o peso, aproxime o valor da cota index ao nominal pretendido, assim como o contrário.

Na tabela 26 apresentam-se os resultados dos quocientes S/N de cada solução de otimização A e B, e dos ensaios da matriz L_9 para fins comparativos.

Tabela 26 - Quocientes S/N individuais e totais

Ensaio	S/Nci1	S/Nci2	S/Np1	S/Np2	S/Ntotal
1	19,69	10,22	-14,38	-11,39	4,15
2	24,73	19,44	-1,66	3,57	46,08
3	11,31	14,41	-17,12	-14,95	-6,35
4	12,97	14,42	-13,09	-11,59	2,71
5	19,00	23,37	-0,24	5,19	47,32
6	19,26	25,63	-8,27	-3,53	33,09
7					
8	18,89	19,24	5,76	-3,06	40,85
9	22,70	27,06	-11,63	-8,19	29,95
Solução A	25,91	30,15	-0,12	-0,21	55,72
Solução B	30,00	31,55	7,41	7,38	76,34

Constata-se que as melhores combinações testadas são efetivamente as soluções A e B, uma vez que possuem um quociente S/N_{total} mais elevado. Este facto não prova que são as melhores combinações possíveis, mas não deixa de ser um bom indicador. Entre as duas soluções a melhor a solução ótima é a B.

Por forma a ter um termo de comparação do desempenho da solução proposta com o verificado ao longo do período em estudo, simularam-se os índices de capabilidade para um mês (≈ 30 amostras).

Tabela 27 - Índices capabilidade solução A

Cavidade I				Cavidade II			
Cp		Cpk		Cp		Cpk	
Peso	Cota Index	Peso	Cota Index	Peso	Cota Index	Peso	Cota Index
56,62	4,67	55,46	4,54	15,93	15,83	15,83	13,24

Embora a comparação seja meramente indicativa, uma vez que não é possível simular as variações ocorridas durante um mês de produção, dá para ter uma ideia acerca da tendência dos valores das características-críticas de qualidade. Comprando os valores dos índices de capabilidade obtidos (Tabela 27) com os da tabela 3 verifica-se que não só os valores de C_p foram elevados, significando que a variação foi reduzida, como a diferença entre os C_p e os C_{pk} correspondentes não foi significativa, ou seja, as respostas variam pouco em torno do seu valor nominal.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

A elaboração deste trabalho permitiu perceber a influência que as principais variáveis do processo de injeção têm na qualidade final das peças. A tarefa de pesquisa bibliográfica teve por objetivo enquadrar o conhecimento existente acerca do processo de injeção, identificando as principais variáveis envolvidas: máquina, molde e material. Nessa fase inicial foram também identificados os parâmetros-chave do processo que devem ser controlados afim de garantir a produção de peças com a qualidade desejada. Fez-se de igual forma um reconhecimento aos defeitos mais recorrentes neste processo com base noutros casos de estudo.

A pesquisa bibliográfica estendeu-se à metodologia *DMAIC*, à teoria sobre desenho de experiencias e ao método de Taguchi utilizado em injeção de plástico. Resultando daí uma proposta de estrutura sequencial que melhor se aplica ao objetivo de diminuir a variação natural do processo e das suas características-críticas de qualidade através da otimização dos parâmetros de injeção.

Da aplicação da metodologia *DMAIC* ao molde MO6490 resultou na identificação das características-críticas de qualidade aspeto visual, peso e cota index, assim como a monitorização da evolução do seu estado desde Fevereiro de 2018 a Maio desse ano através das cartas de controlo e dos seus índices de capabilidade. Constatou-se que houve alterações ao seu desempenho ao longo do período em estudo, tendo sido o mês de março aquele em que o valor dos seus índices foi superior.

Identificaram-se os defeitos que contribuíram para 80% do desperdício da produção do molde em estudo, sendo eles: pontos pretos e manchas, riscos, raiados e incompletos. Estabeleceram-se relações causa-efeito para identificar a origem de cada defeito, descartando as possibilidades menos prováveis.

As causas identificadas como sendo as mais prováveis para o aparecimento de pintas e manchas nas peças foram: contaminação do contentor de transporte aquando da sua alimentação, sujidade acumulada no desumidificador, na tremonha ou nos tubos de ligação, tempos prolongados da matéria-prima na tremonha, e possível desgaste existente em componentes da máquina como fuso, no cilindro ou na válvula de não-retorno.

Para eliminar as pintas e manchas da produção propuseram-se as seguintes medidas: rever os procedimentos e o local de deposição da matéria-prima no contentor de transporte, limpeza dos contentores de transporte com a referência da matéria-prima do molde MO6490, criação de procedimentos de limpeza para os contentores de transporte, limpeza em detalhe do desumidificar, da tremonha e dos tubos de ligação, inspeção ao estado do fuso, do cilindro e da válvula de não-retorno, substituindo-os ou corrigindo-os caso seja necessário.

As causas identificadas como podendo estar na origem do aparecimento de riscos nas peças foram: insuficiência do robot e/ou do operador. Propuseram-se as seguintes tomadas de ação para a sua eliminação: inspeção ao estado da garra do robot e do sistema de ar comprimido, sensibilizar e formar os operadores para que a operação de recolha da peça do tapete seja executada em tempo útil.

As causas identificadas como sendo prováveis para o aparecimento de raiados nas peças são: humidade na matéria-prima e/ou existência de elementos voláteis no processo. Tendo-se proposto as seguintes medidas de correção: inspecionar o estado do desumidificador, corrigindo-o caso seja necessário, verificar se as temperaturas e os tempos de pré-processamento da matéria-prima são cumpridos a cada produção.

Identificaram-se as seguintes causas que podem ser preponderantes na origem de incompletos: ar retido no molde, deficiência no sistema de aquecimento, variação no índice de fluidez do material, insuficiência do sistema hidráulico e da válvula de não-retorno.

Para eliminar ou pelo menos para mitigar a produção de peças incompletas, algo bastante interligado com a instabilidade do processo, foram propostas as seguintes medidas: estudar o aumento da capacidade de escape por via de um alargamento da dimensão dos canais de evacuação, limpeza dos canais de escape, avaliar a capabilidade do sistema de aquecimento (resistências), fazer o controlo da composição do material adquirido assim como o seu índice de fluidez por via de espectrómetros e instrumentos de medição do índice de fluidez, avaliar a capabilidade do sistema hidráulico e da válvula não-retorno, instalar sensores de pressão e temperatura nos moldes, permitindo um controlo mais robusto do processo e uma identificação mais rápida e precisa da origem da perturbação.

Os ensaios de capabilidade que se efetuam para aferir o estado da máquina revelaram-se de pouca utilidade dado o longo espaçamento temporal existente entre eles, não se podendo retirar a partir deles grandes conclusões acerca da real capacidade da máquina, sugerindo-se que se encurte o intervalo temporal de seis para pelo menos três meses.

A partir dos resultados gerados da matriz L_{12} e das cartas de controlo para a cota index, verificou-se não ser possível que as peças cumpram os valores especificados em projeto dessa dimensão sem que para isso se forme rebarba. Propôs-se uma alteração dos 320,00mm nominal para 319,52mm e 319,37mm, para a cavidade 1 e 2 respetivamente. A justificação para a escolha desses novos valores é sustentada por terem sido os valores médios medidos durante o mês de março, altura em que o peso se verificou mais estável em torno do seu valor nominal, e uma vez que existe uma correlação no mínimo moderada entre estas grandezas, considerou-se que esses seriam os valores alvos mais apropriados.

Das análises ANOVA realizadas pôde-se concluir que os parâmetros que têm um maior impacto nas respostas peso e cota index são: 2ª pressão, temperatura de injeção, velocidade de injeção e pressão de injeção.

A combinação paramétrica que melhor satisfaz a otimização da cota index das peças produzidas para o molde MO6490 é a solução A com os seguintes níveis: temperatura de injeção (173°C), pressão de injeção (92×10^5 Pa), 2ª pressão (43×10^5 Pa) e velocidade de injeção (53 m/s).

A melhor combinação paramétrica que leva a que os valores do peso e da cota index mais se aproximem dos seus valores nominais com uma menor variação em seu redor é a solução B com os seguintes níveis: temperatura de injeção (167°C), pressão de injeção (98×10^5 Pa), 2ª pressão (43×10^5 Pa) e velocidade de injeção (59 m/s).

5.2 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro propõe-se a continuidade da metodologia *DMAIC* ao molde MO6490, acompanhando a execução das propostas de melhoria e monitorização do processo após essas alterações. Ainda referente ao caso de estudo desenvolvido, propõe-se um novo ensaio de otimização com a matriz L_9 reduzindo o intervalo dos níveis dos fatores afim de perceber se é possível atingir melhores resultados.

Propõe-se a execução do método de Taguchi utilizado a outros moldes do Grupo, verificando a sua efetividade.

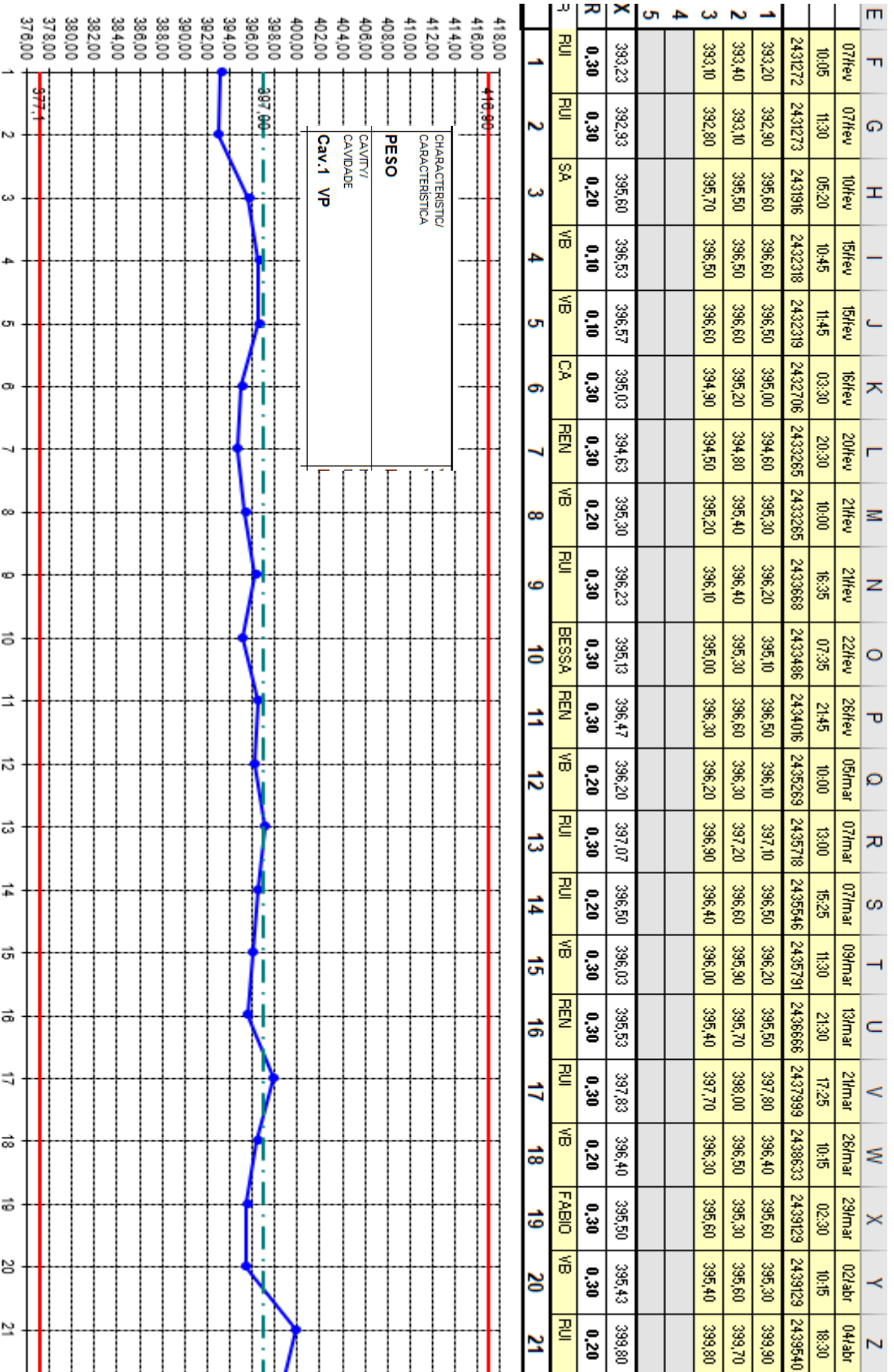
Referências

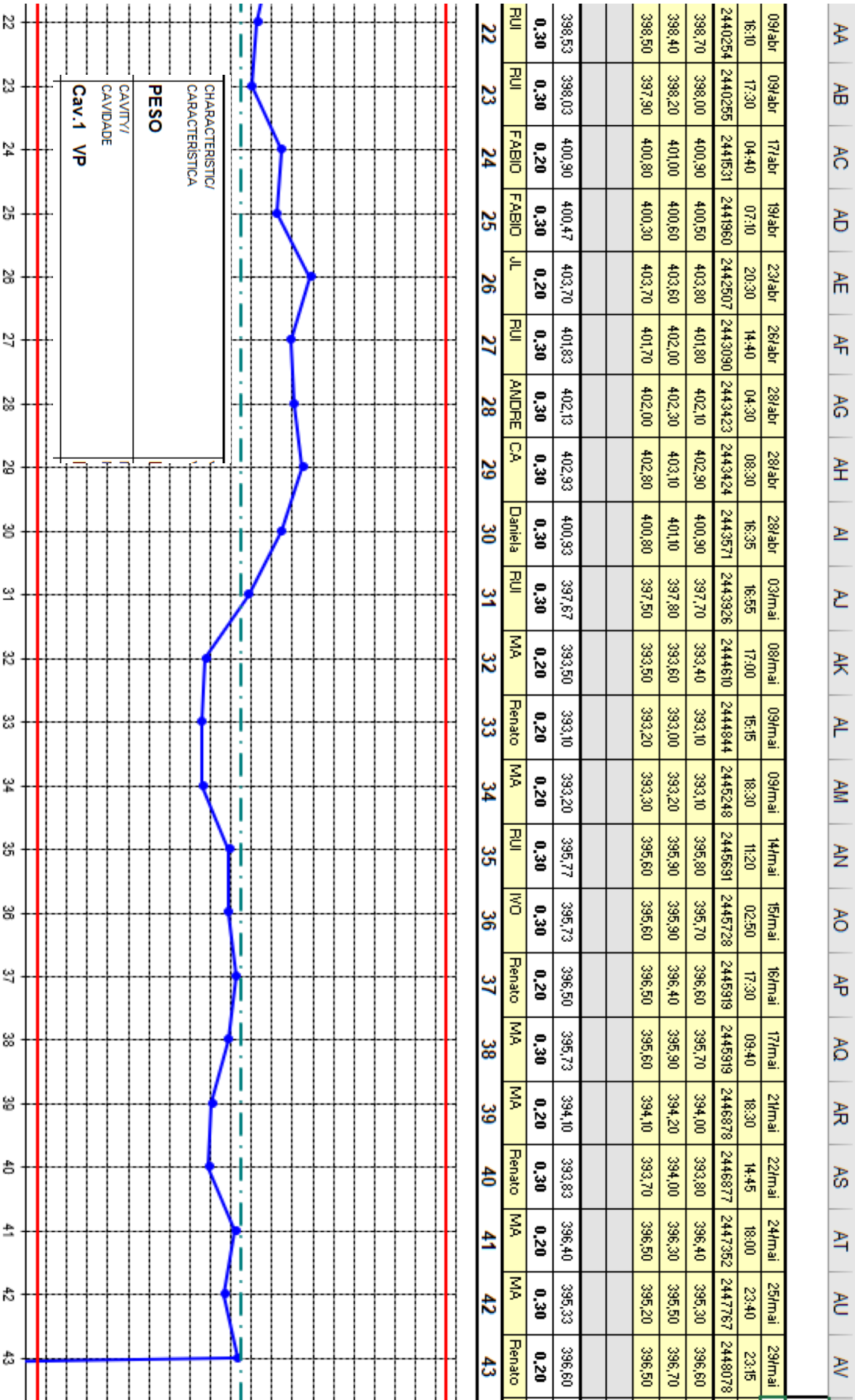
- Alaa *et al.* 2018, “Quality Improvement in Plastic Injection Molding Industry Applying Lean Six Sigma to SME in Kuwait”, American University of the Middle East. Eqaila, Kuwait.
- Allen, T. 2006, “Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma”, Edições Springer-Verlag. Londres, Inglaterra. ISBN: 978-1-84628-200-3.
- Bass, I. 2007, “Six Sigma Statistics: With Excel and Minitab”, Edições McGraw-Hill Education. Nova Iorque, Estados Unidos. ISBN: 978-0071489690.
- Bayeux, C. 2001, “Banas Qualidade – Análise da Capabilidade de Processos”, Centro Federal de Educação Tecnológica. Rio de Janeiro, Brasil.
- Beamont, J. 2004, “Runner and Gating Design Handbooks”, Edições Hanser. Munique, Alemanha. ISBN: 978-1569904213.
- Bryce, D. 1996, “Plastic Injection Molding: manufacturing process fundamentals”, Edições SME. Southfield, Estados Unidos. ISBN: 9780872634725.
- Centimfe. 2004, “Ação de Formação: Moldação por Injeção Avançado”, Edições Centimfe. Marinha Grande, Portugal.
- Chen, D. *et al.* 2016, “Study of Injection Molding Warpage Using Analytic Hierarchy Process and Taguchi Method”, National Changhua University of Education. Changhua, Taiwan.
- Chen, R. *et al.* 1997, “Application of Taguchi’s Method on the Optimal Process Design of Injection Molded PC/PBT Automobile Bumper”, National Cheng-Kung University. Tainan, Taiwan.
- Crawford, R.J. 1998, “Plastic Engineering, 3rd edition”, Edições BH. Oxford, Inglaterra. ISBN: 9780080524108.
- Cruz, S. 2002, “Moldes de Injeção, 2nd Edição”, Edições Hemus. São Paulo, Brasil. ISBN: 85-2890-311-7.
- Cunha, A.M. 1997, “Processo de Moldação por Injeção”. Universidade do Minho, Engenharia de Polímeros. Guimarães, Portugal.
- Cunha, A.M. 2004. “Manual do Projetista para Moldes de Injeção de Plásticos Vol2. – Moldação por injeção e materiais plásticos”, Edições Centimfe. Marinha Grande, Portugal.
- Gonçalves, C. 2014, “Novas Técnicas e Ferramentas para Operações de Montagem e Afinação de Componentes na Indústria de Moldes para Injeção Termoplástica”, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Porto, Portugal.
- Henderson, J. *et al.* 2006, “Cycle Time Reduction for Optimization of Injection Molding Machine Parameters for Process Improvement”, Kimmel School of Construction Management, Engineering, and Technology Western Carolina University. Cullowhee, Estado Unidos.
- <http://www.demar.eel.usp.br/polimeros>. Acedido a 5-04-2018.
- <http://www.simoldes.com/plastics/>. Acedido a 14-03-2018.
- Kasia, M. 2010, “Industrial Investigation of Dark Spots and Dark Streaks in TPO Injection Molded Parts”, Iowa State University. Iowa, Estados Unidos.
- Kavade, M. *et al.* 2012, “Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology”, Rajarambapu Institute of Technology. Sangli, India.

- Kazmer, D. 2007, "Injection Mold Design Engineering", Edições Hanser. Munique, Alemanha. ISBN: 978-1569904176.
- Kent, R. 2016, "Quality Management in Plastics Processing", Edições Wiley. Nova Jérсия, Estados Unidos. ISBN: 9780081021262.
- Kulkarni, S. 2010, "Robust Process Development and Scientific Molding", Edições Hanser. Munique, Alemanha. ISBN: 978-1569905012.
- Mansur, A. *et al.* 2006, "Plastic Injection Quality Controlling Using the Lean Six Sigma and FMEA Method", Universitas Islam Indonesia, Faculty of Industrial Technology. Sleman, Indonésia.
- Mehat, N. *et al.* 2011, "Multi-Response Optimization of Injection Moulding Process Parameters Using the Taguchi Method", Universitii Sains of Malaysia, Engineering Campus. Nibong Tebal, Malásia.
- Moita, N. 2007, "Implementação do Método Taguchi e Análise de Experiências na Fase de Testes de Moldes para Injeção de Plásticos", Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Montgomery, D. 2009, "Introduction to Statistical Quality Control", Edições Wiley. Nova Jérсия, Estados Unidos. ISBN: 978-0470169926.
- Montgomery, D. 2013, "Design and Analysis of Experiments", Edições Wiley. Nova Jérсия, Estados Unidos. ISBN: 978-1-118-14692-7.
- Osswald, M. 2012, "Material Science of Polymers for Engineers". Edições Hanser. Munique, Alemanha. ISBN: 978-1-56990-514-2.
- Pavlicková, M. *et al.* 2016, "Evaluation of Inking Quality in Plastics Molding by Six Sigma Method", Technical University of Kosice. Kosice, Eslováquia.
- Pereira, A. 2013, "Implementação de um Programa de Melhoria da Qualidade num Processo Produtivo de Peças de Injeção", Universidade do Minho, Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial. Guimarães, Portugal.
- Pinto, R. 2012. "Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos". Instituto Superior de Engenharia. Coimbra, Portugal.
- Pyzdek, T. 2003, "The Six Sigma Project Planner", Edições McGraw-Hill Education. Nova Iorque, Estados Unidos. ISBN: 978-0071411837.
- Randelovic, S. 2015, "Risk Assessment in Injection Molding Process", University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering. Nis, Sérvia.
- Roderick, A. *et al.* 2015, "The Certified Six Sigma Green Belt Handbook", Edições American Society for Quality. Milwaukee, Estados Unidos. ISBN: 978-0873896986.
- Rosato, D. 1985, "Injection Molding Handbook", Edições Springer Verlag. Nova Iorque, Estados Unidos. ISBN: 9781461370772.
- Roy, R. 2001, "Design of Experiments Using Taguchi Approach", Edições Wiley. Nova Jérсия, Estados Unidos. ISBN: 978-0471361015.
- Rutland, P.L. 2018, "Plastic Injection Moulding Machine".
- Shoemaker, J. 2006, "Moldflow Design Guide", Edições Hanser. Munique, Alemanha. ISBN: 978-3-446-41854-7.
- Srivastava, P. 2005, "Value Stream Mapping on Foam Injection Moulding Process – The Starting Point of a Six Sigma Project", University of Wisconsin-Stout, Management Technology. Wisconsin, Estados Unidos.
- Tayal, V. *et al.* 2012, "Improvement in Production Rate by Reducing the Defects of Injection Moulding", M. Tech Scholar in Deptt. of Mechanical Engineering. Haryana, Índia.
- Vasu, S. 2008, "Quality Improvement Using Six Sigma Concepts in Injection Moulding Manufacturing". Universiti Teknikal Malaysia, Faculty of Manufacturing Engineering. Malaca, Malásia.
- Vikash *et al.* 2014, "Six Sigma; As applied in Quality Improvement for Injection Moulding Process", Integral University. Lucknow, Índia.
- Voehl, F. 2014, "The Lean Six Sigma Black Belt Handbook", Edições Productivity Press. Nova Iorque, Estados Unidos. ISBN: 978-1466554689.

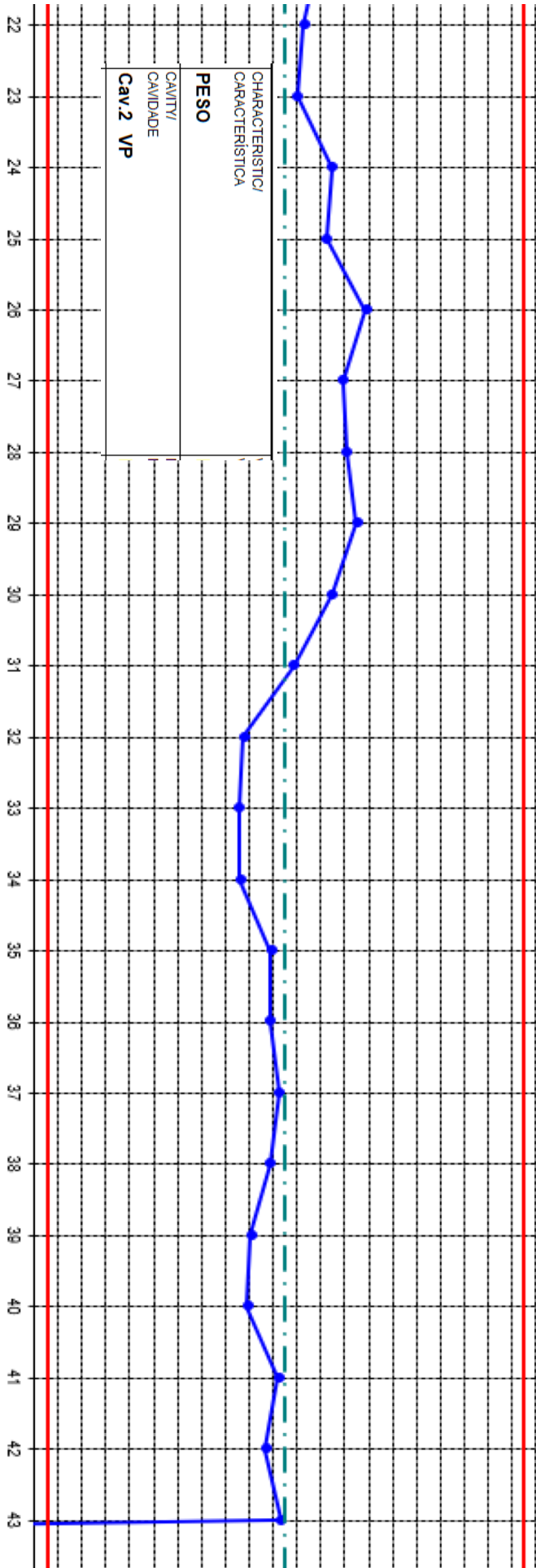
Yang, Y. *et al.* 2016, “Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization”, Edições Hanser. Munique, Alemanha. ISBN: 978-1-56990-593-7.

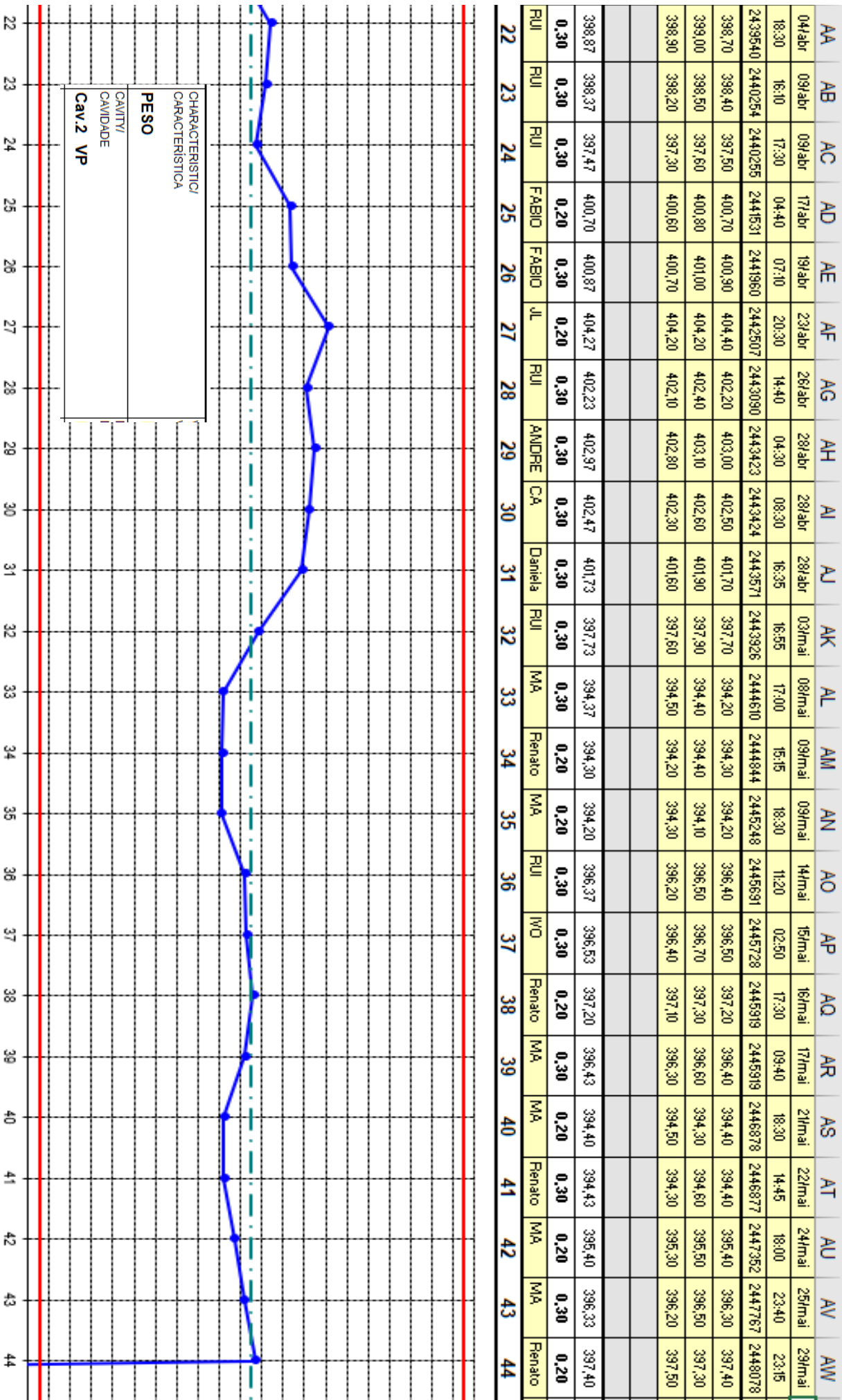
ANEXO A: Cartas de controlo

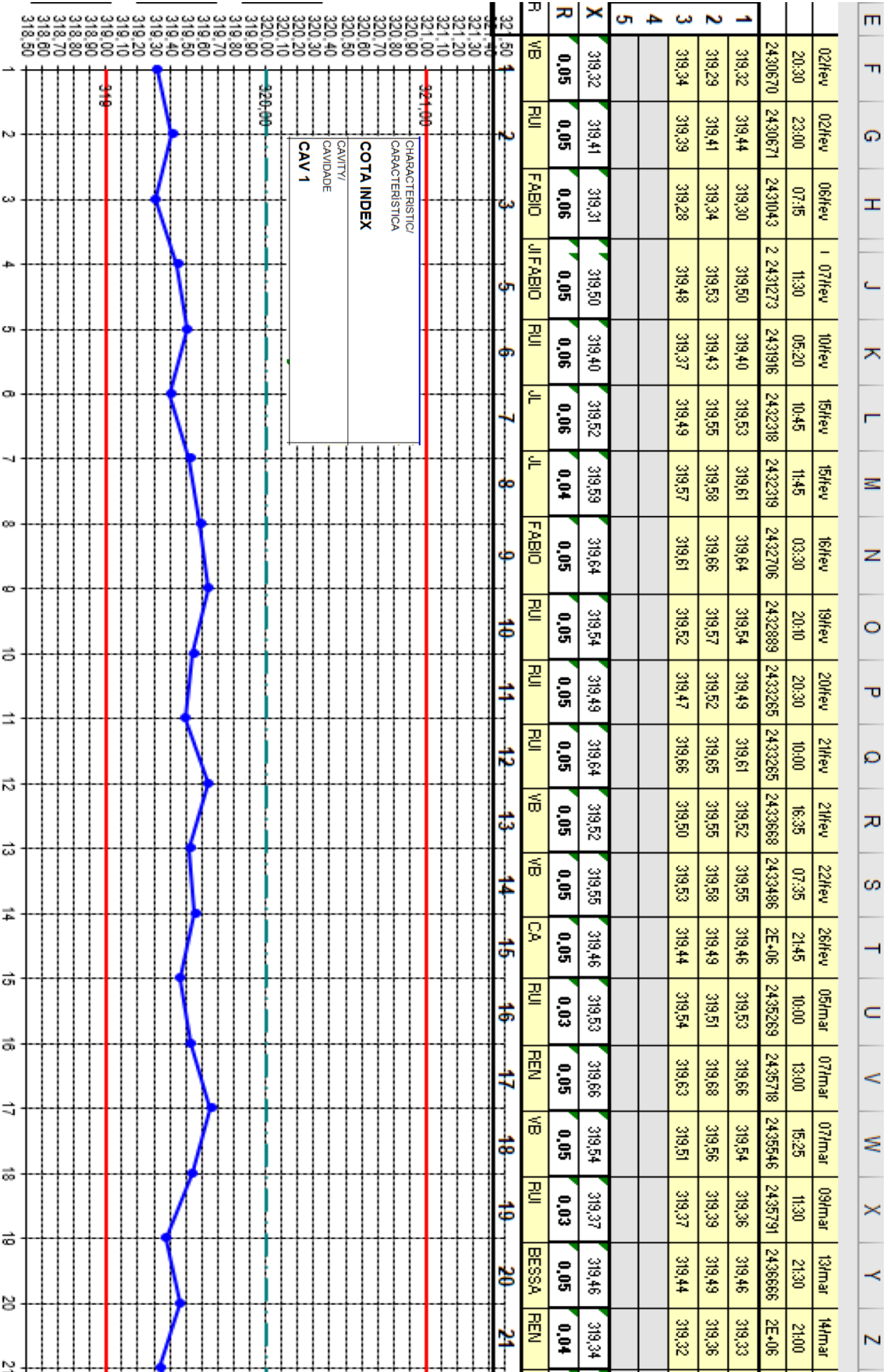


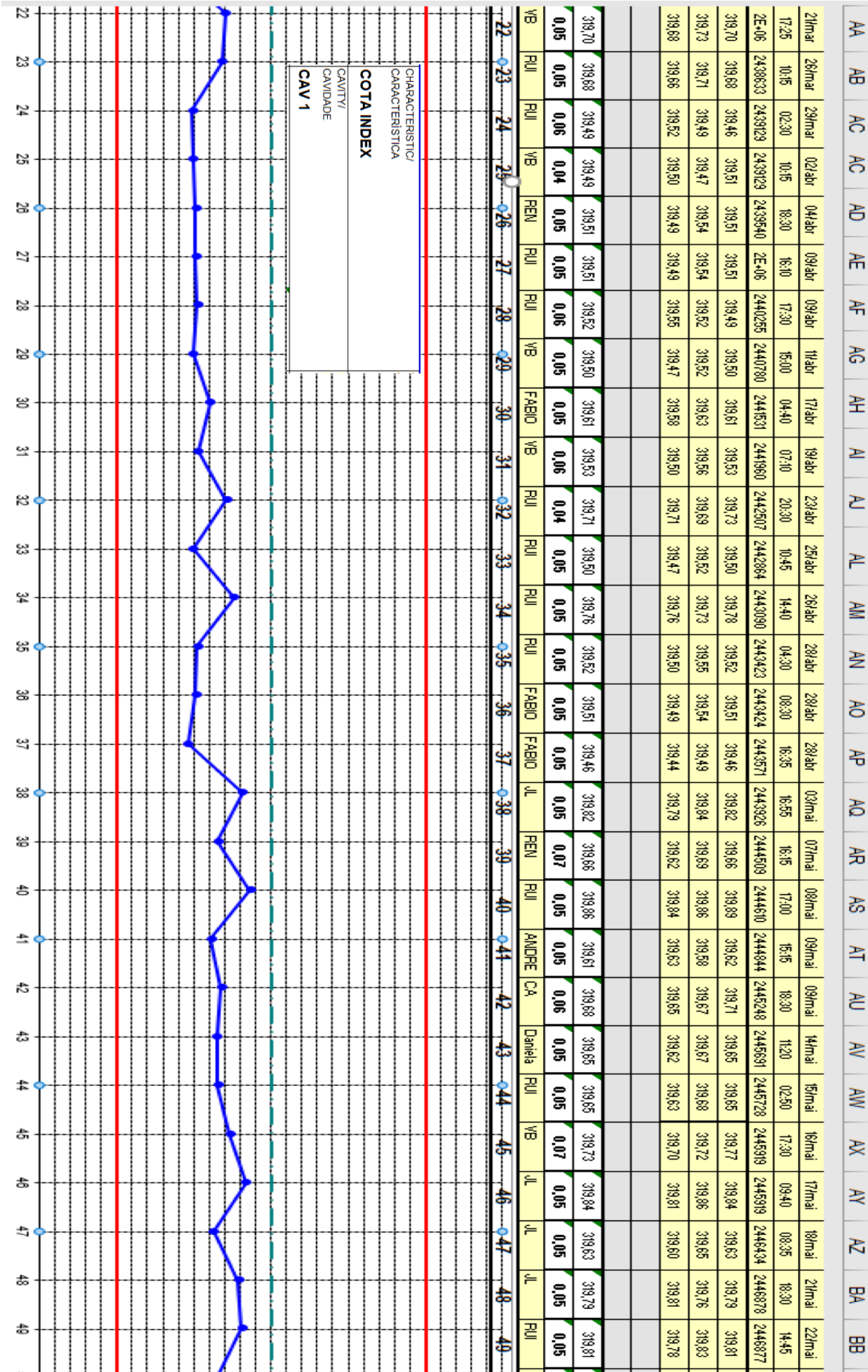


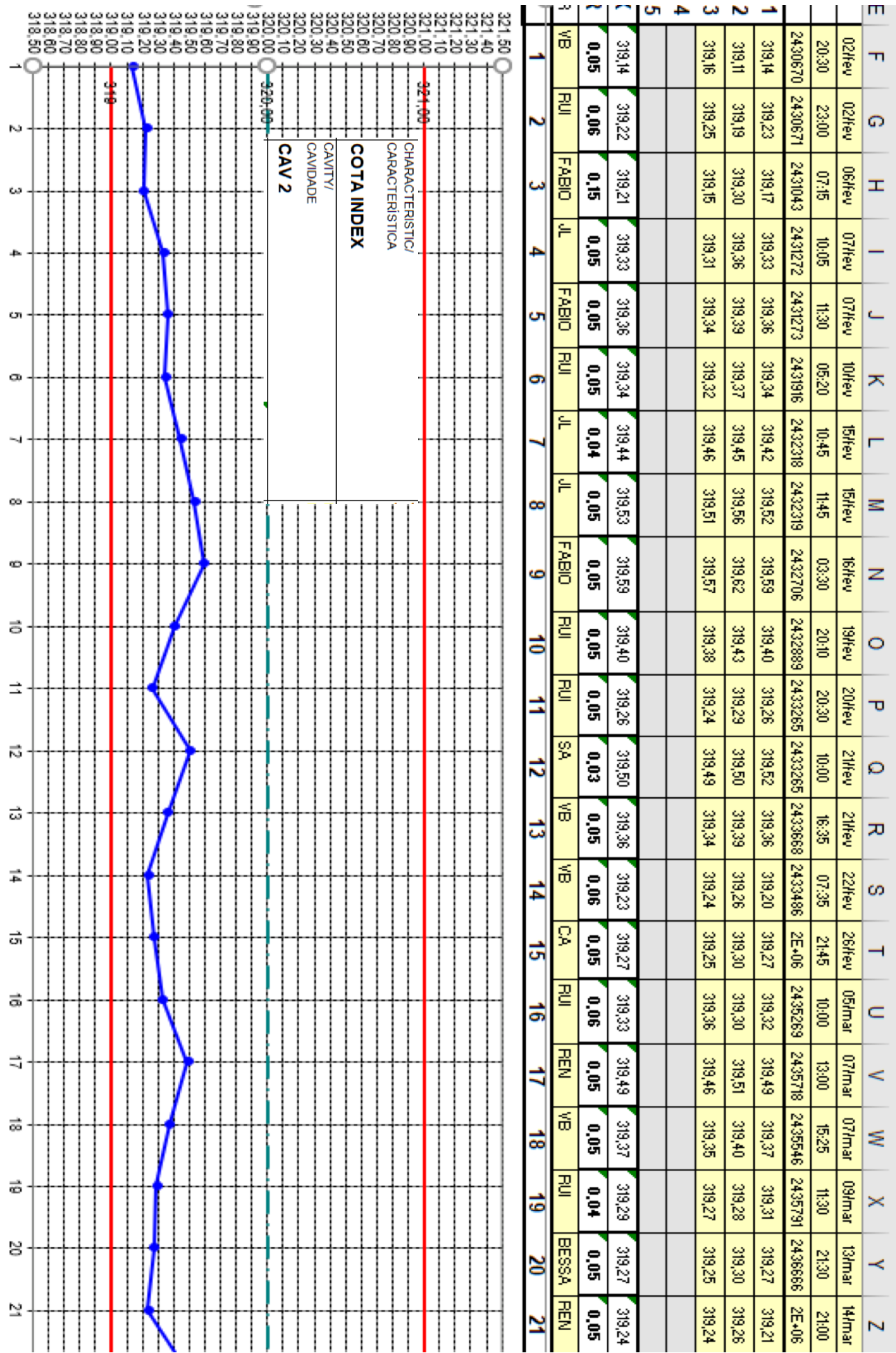
AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV
09/abr	09/abr	17/abr	19/abr	23/abr	26/abr	28/abr	28/abr	28/abr	03/mai	08/mai	09/mai	09/mai	14/mai	15/mai	16/mai	17/mai	21/mai	22/mai	24/mai	25/mai	29/mai
16:10	17:30	04:40	07:10	20:30	14:40	04:30	08:30	16:35	16:55	17:00	15:15	18:30	11:20	02:50	17:30	09:40	18:30	14:45	18:00	23:40	23:15
2440254	2440255	2441531	2441960	2442507	2443090	2443423	2443424	2443571	2443926	2444510	2444844	2445248	2445691	2445728	2445919	2445919	2446878	2446877	2447352	2447767	2448078
396,70	398,00	400,90	400,50	403,80	401,80	402,10	402,90	400,90	397,70	393,40	393,10	393,10	395,80	395,70	396,60	395,70	394,00	393,80	396,40	395,30	396,60
396,40	398,20	401,00	400,60	403,60	402,00	402,30	403,10	401,10	397,80	393,60	393,00	393,20	395,90	395,90	396,40	395,90	394,20	394,00	396,30	395,50	396,70
396,50	397,90	400,80	400,30	403,70	401,70	402,00	402,80	400,80	397,50	393,50	393,20	393,30	395,60	395,60	396,50	395,60	394,10	393,70	396,50	395,20	396,50
396,53	398,03	400,90	400,47	403,70	401,83	402,13	402,93	400,93	397,67	393,50	393,10	393,20	395,77	395,73	396,50	395,73	394,10	393,83	396,40	395,33	396,60
0,30	0,30	0,20	0,30	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,20	0,20	0,20	0,30	0,30	0,20	0,30	0,20	0,30	0,20	0,30	0,20
FUI	FUI	FABIO	FABIO	JL	FUI	ANDRE	CA	Daniela	FUI	MA	Renato	MA	FUI	IWO	Renato	MA	MA	Renato	MA	MA	Renato
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43

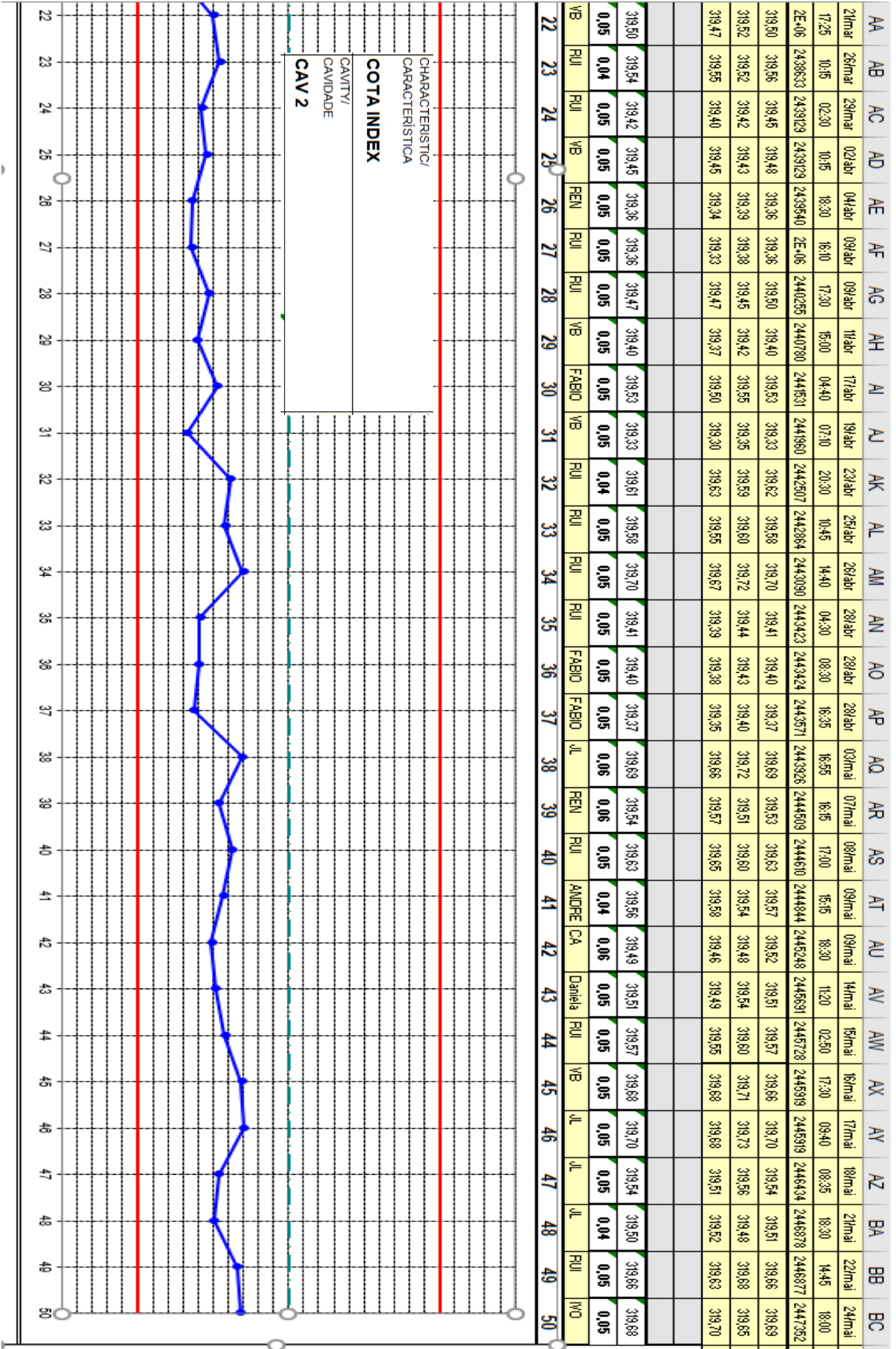




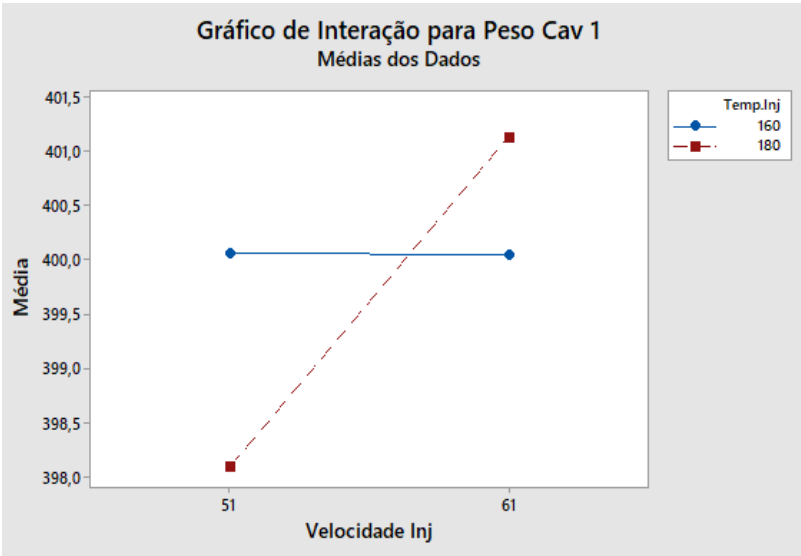
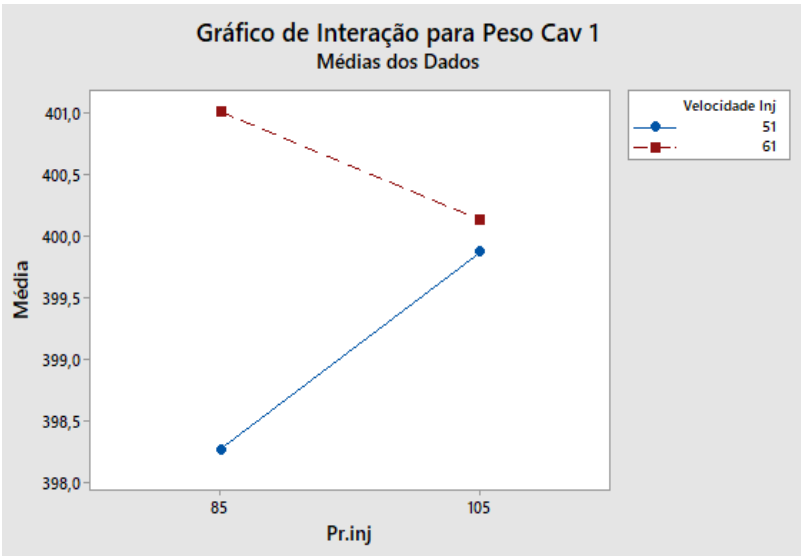


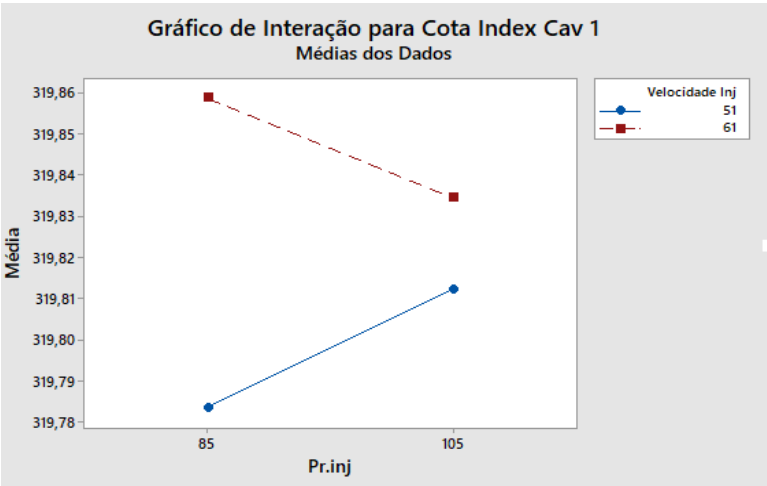
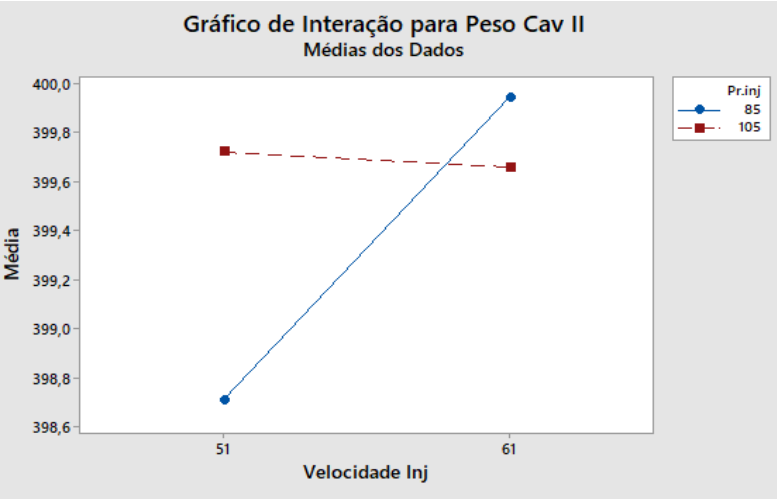
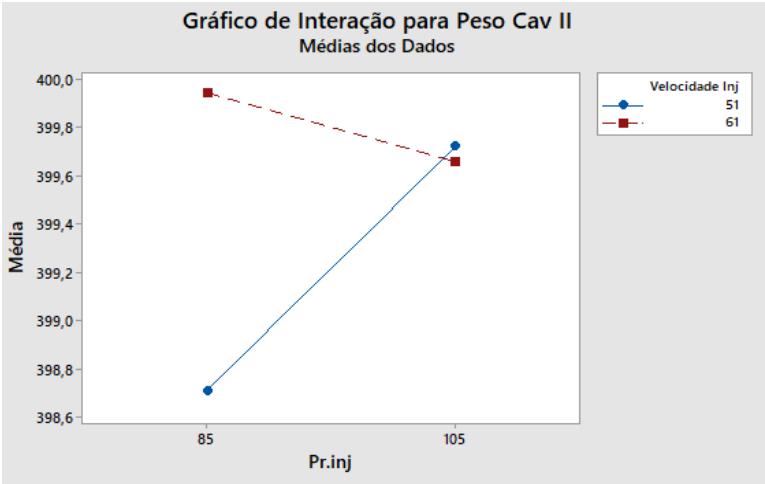


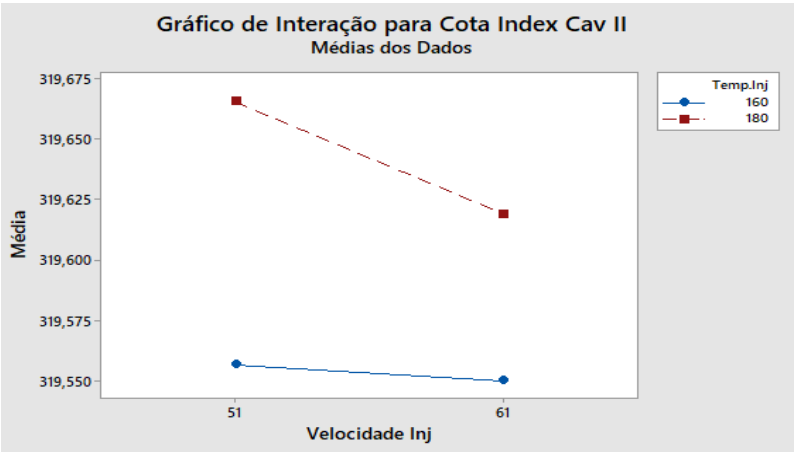
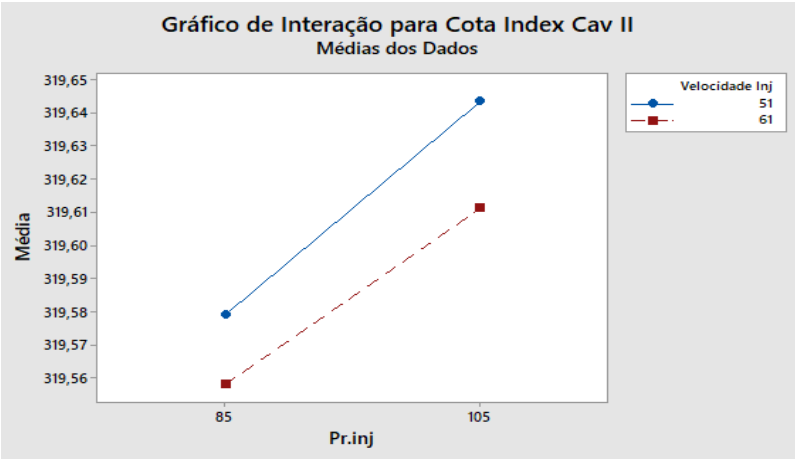
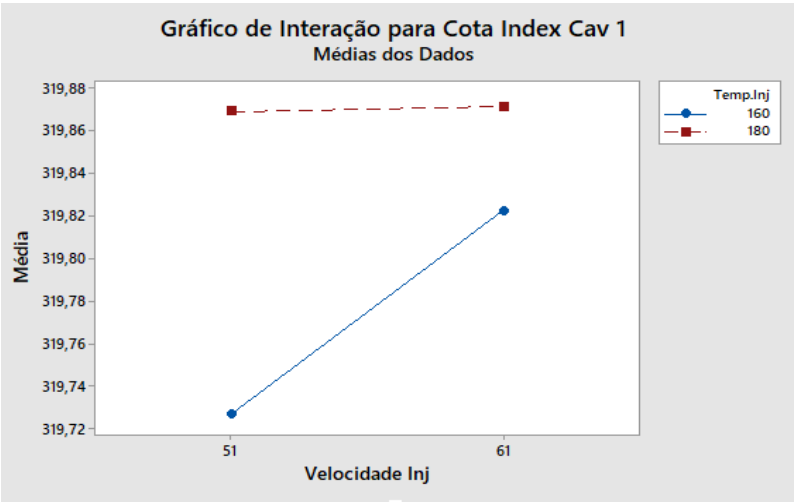




ANEXO B: Interações







ANEXO C: Ficha de Parâmetros

Simoldes		Ficha de Parâmetros de Processo		Departamento de Produção Pag 1 de 2	
Molde Nº: 6490		Nº Cavidade: 2		Máquina: EN 400 XIV Cliente: PSA	
Desig. Peça: GABITE PM. SUP. VP		Referência NP: 1200056			

CONTROLO DE PARÂMETROS			
Parâmetro	Mín	Nom	Máx
Tempo de Injecção	2,8	3,8	4,8
Aliviada	5	12	15
Tempo plastificação	16	18	20
Tempo de ciclo	40	43	42
Parâmetro	Tolerância		
Temp. Fuso	15		
Temp. Molde (máq.)	15		

Tolerância +/- 10°C		TEMPERATURA DO FUSO	
Bico	200 °C	225 °C	245 °C
		Diâmetro do Fuso Ø 80 mm	

Bico de Injecção	
Bico Direto :	<input checked="" type="checkbox"/>
Bico misturador :	<input type="checkbox"/>
Nº de elementos :	<input type="checkbox"/>
Diâmetro do furo do bico mm: 8	

TEMPERATURA DO MOLDE			
Grupo 1	Grupo 15	Grupo 29	Grupo 43
Grupo 2	Grupo 16	Grupo 30	Grupo 44
Grupo 3	Grupo 17	Grupo 31	Grupo 45
Grupo 4	Grupo 18	Grupo 32	Grupo 46
Grupo 5	Grupo 19	Grupo 33	Grupo 47
Grupo 6	Grupo 20	Grupo 34	Grupo 48
Grupo 7	Grupo 21	Grupo 35	Grupo 49
Grupo 8	Grupo 22	Grupo 36	Grupo 50
Grupo 9	Grupo 23	Grupo 37	Grupo 51
Grupo 10	Grupo 24	Grupo 38	Grupo 52
Grupo 11	Grupo 25	Grupo 39	Grupo 53
Grupo 12	Grupo 26	Grupo 40	Grupo 54
Grupo 13	Grupo 27	Grupo 41	Grupo 55
Grupo 14	Grupo 28	Grupo 42	Grupo 56

Tolerância +/- 10°C	
Temperatura Cavidade	14 °C
Temperatura Molde	14 °C
Temperatura Normalização	14 °C

Tolerância +/- 10°C	
Agua (litro)	14
Condutividade	14
Temp. Massa Fundida	14

DADOS INIECÇÃO	
Curso Plást. Descomp.	Velocidade de Injecção mm/seg. Tol. +/- 5 mm/seg
Tol. +/- 2 mm	Tol. +/- 2 mm
216	1
Curso Injecção Tol. +/- 2 mm	216 196 165 147 112 93 69 46 38
Pressão Injecção Tol. +/- 10 bar	95
Pressão máx Injecção Tol. +/- 5 bar	83
2ª pressão Tol. +/- 5 bar	43 43 43 43 43 43 43 43 43 43
Tempo 2ª pressão Tol. +/- 1 seg	4
Vel. Retração Fuso Tol. +/- 5 mm	100 100 100 100 100
Contra pressão Tol. +/- 5 bar	13 13 13 8 5

Injecção de gás - Aparelho nº	
Peso de gás Tol. +/- 1 seg	Peso de gás Tol. +/- 1 seg
Bico 1	Bico 2
T.S.P. Tempo Pressão Tol.	T.S.P. Tempo Pressão Tol.
1.5 seg	1.5 seg
2.5 seg	2.5 seg
20 Bar	20 Bar

Injecção Sequencial	
Bico	Abre Fecha
mm/seg	mm/seg
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16

Observações: Em Bico na MIA. É A ZONA G	
PROD. TEN N° 00 / TEN RESERVA	

Afinação realizada por: Reis	Data: 08/07/18	Verificado: Reis
Aprovado: faive		Edição: 8

ANEXO D: Ficha Técnica do Material

ExxonMobil Exxtral™ CMV 205 Performance Polyolefin

Category : Polymer , Thermoplastic , Ethylene Butyl Acrylate

Material Notes:

Product Description: A specialty thermoplastic polyolefin resin characterized by high stiffness and designed for automotive interior applications in which good surface finish and good UV resistance are required. Availability: Africa & Middle East, Asia Pacific, Europe, South America and North America Features: Balanced Stiffness/Toughness Good Dimensional Stability Good Colorability Good Impact Resistance Good Surface Finish Low to No Fogging Uses: Automotive Applications Automotive Interior Parts Automotive Interior Trim Processing Method: Injection Molding Information provided by ExxonMobil

Order this product through the following link:

http://www.lookpolymers.com/polymer_ExxonMobil-Exxtral-CMV-205-Performance-Polyolefin.php

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.05 g/cc	0.0379 lb/in³	ISO 1183
Melt Flow	20 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 230 °C	20 g/10 min @Load 4.76 lb, Temperature 446 °F	ISO 1133

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength at Break	17.5 MPa	2540 psi	ISO 527-2/50
Tensile Strength, Yield	22.0 MPa	3190 psi	ISO 527-2/50
Elongation at Break	21 %	21 %	ISO 527-2/50
Elongation at Yield	3.0 %	3.0 %	ISO 527-2/50
Tensile Modulus	2.10 GPa	305 ksi	Secant; ISO 527-2
Charpy Impact, Notched	0.315 J/cm² @Temperature 0.000 °C	1.50 ft-lb/in² @Temperature 32.0 °F	Complete Break; ISO 179
	0.609 J/cm² @Temperature 22.8 °C	2.90 ft-lb/in² @Temperature 73.0 °F	Complete Break; ISO 179

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	113 °C	235 °F	ISO 75-2/B
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	57.8 °C	136 °F	ISO 75-2/A

